



**Henrique Lopes dos Santos Lopes**

Licenciado em Engenharia Geológica

## **Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia**

### **Estudos de Caracterização Térmica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
Engenharia Geológica (Geotecnia)

Orientador: Doutora Ana Maria Carvalho Pinheiro Vieira, Investigadora Auxiliar LNEC

Co-orientador: Doutora Maria da Graça Azevedo Brito, Professora Auxiliar FCT-UNL

Júri:

Presidente: Doutora Ana Paula Fernandes da Silva, Professora Auxiliar FCT-UNL

Arguente: Doutora Sofia Maria Mesquita Soares, Professora Adjunta ESTIG-IPBeja

Vogal: Doutora Ana Maria Carvalho Pinheiro Vieira, Investigadora Auxiliar LNEC



FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

**Setembro de 2014**

**UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**

**Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia**  
**Estudos de Caracterização Térmica**

**Henrique Lopes dos Santos Lopes**

Orientadora: Professora Doutora Ana Maria Carvalho Pinheiro Vieira, Investigadora Auxiliar (LNEC)

Co-orientadora: Professora Doutora Maria da Graça Azevedo Brito, Professora Auxiliar (FCT-UNL)

Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Geológica-Geotecnia pela Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa no âmbito do protocolo de cooperação entre a FCT/UNL e o LNEC.

Lisboa, 24 de Setembro de 2014



### **“Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia-Estudos de Caracterização Térmica”**

Copyright © Henrique Lopes dos Santos Lopes, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.



*Esta dissertação não se encontra redigida segundo o novo acordo ortográfico da Língua Portuguesa.*



# Agradecimentos

---

A dissertação que agora concluo é corolário de um percurso escolar, nem sempre fácil, mas que sem dúvida muito me ensinou e valorizou. O mérito dos resultados obtidos, não é apenas meu mas também de todos quantos me acompanharam ao longo destes anos e a quem estarei sempre grato. Por isso não posso deixar de agradecer a algumas instituições e pessoas em particular.

Em primeiro lugar, à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa por tão bem me ter acolhido e é claro pelo que me proporcionou em termos de formação e aprendizagens.

Ao Laboratório Nacional de Engenharia Civil, nas pessoas do seu Presidente, Professor Doutor Carlos Pina, e da Directora do Departamento de Geotecnia, Professora Doutora Laura Caldeira, por todos os meios disponibilizados para a realização desta dissertação.

Agradecimento muito especial à minha Orientadora, Professora Doutora Ana Vieira, pela amizade, aprendizagens, colaboração e conselhos sempre tão orientados na exploração e desenvolvimento deste tema.

Agradecimento à minha co-Orientadora, Professora Doutora Maria da Graça Brito, pela ajuda prestada.

Ao corpo docente do Departamento de Ciências da Terra. Em especial à Professora Doutora Ana Paula Silva, pelo apoio e compreensão contínua em particular durante o último ano.

À Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja (ESTIG), em particular à Professora Doutora Sofia Soares, pela paciência e disponibilidade ao receber-me e pela ajuda durante a realização dos ensaios. Ao Mestre Paulo Silva, pelas explicações esclarecedoras acerca dos conceitos físicos que sustentam o dispositivo desenvolvido na ESTIG. À Engenheira Filomena Ramos, pela ajuda, apoio e boa disposição durante a realização da componente prática desta dissertação.

Aos meus pais, a quem tudo devo, ser-lhes-ei eternamente grato pela fé inabalável em mim, pelo amor e carinho de todos os dias. Ao meu pai, pelo exemplo de vida, força, motivação, coragem e crítica. À minha mãe pela doçura e ternura de sempre.



Aos meus irmãos...Ao Cristiano, pela companhia de todos os dias, amor, paciência e silêncios enriquecedores. Por ter sido meu companheiro de viagem. Ao Miguel pela irreverência divertida da sua idade, por ser o “puto reguila” de sempre. Foi a ele, sem dúvida, a quem mais faltei nos últimos anos...

Aos meus avós. À minha avó Maria José por tudo, mas em especial por ter sempre acreditado, por me ter ouvido e por ter sido a minha companhia. Ao meu avô Carlos, pela ternura e por me ter ensinado que a vida é simples...Aos meus avós, Lia e José, pelos bons bocadinhos de descontração que me proporcionaram durante estes anos.

À Denise, por ser a luz dos meus olhos, o meu porto seguro. Por ter partilhado comigo as minhas desilusões e angústias, por ter estado sempre nos bons e maus momentos apesar da distância...Por ter sido tão boa ouvinte...

Aos meus amigos de faculdade, em especial ao Luís, Diana Silva, Diana Gonçalves, João, Laura e Bruno. Ao Gonçalo, companheiro de LNEC, que tive a felicidade de conhecer no último ano, mas que sem dúvida se tornou também um bom amigo.

Aos meus amigos de Ourique, em especial ao António, pela amizade de sempre.

À Tânia pela amizade e motivação...

À Magda e D. Joaquina pela amizade...

A todos, muito obrigado...

*À minha família e namorada...*

---

# Resumo

---

A crescente atenção revelada pelas sociedades nos últimos anos, no que respeita à sustentabilidade energética do planeta, tornou-se o principal impulsionador para o desenvolvimento de formas de exploração de energia que contribuem para a redução dos gases com efeito de estufa.

A energia geotérmica de baixa entalpia (*Shallow Geothermal Energy*–SGE) é um dos tipos de energia verde utilizados para aquecimento e arrefecimento de edifícios. Nas últimas décadas, tem vindo a demonstrar uma elevada eficácia energética e aplicabilidade em diversos países em todo o mundo. Aos sistemas convencionais de exploração abertos e fechados, seguiram-se os sistemas com estruturas de fundações termoactivas. A Suíça e Áustria foram os países pioneiros onde se iniciou a exploração utilizando este tipo de estruturas, primeiro com recurso a lajes de fundo e depois, em 1984, através de estacas. A utilização generalizada de fundações de forma bi-funcional poderá resultar numa compensação sustentável dos seus custos de implementação. No entanto, é necessário conhecer de forma sólida o comportamento geotécnico dos solos face à imposição das diferentes acções térmicas provocadas pelos Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia. A eficácia dos *Ground Energy Systems* (GES) está directamente associada à capacidade que os solos apresentam para fornecer ou dissipar calor. O desempenho dos GES e a sua eficiência está ainda por avaliar relativamente às condições existentes em Portugal. As propriedades térmicas dos solos são um desses aspectos, sendo da maior relevância na avaliação do seu desempenho.

Nesta dissertação são abordados os diferentes mecanismos de transferência de calor nos solos bem como propriedades térmicas necessárias para a sua caracterização. Apresenta-se também um caso prático, para o qual foi realizada caracterização térmica e posterior modelação numérica de uma estrutura termoactiva, determinando-se os campos de temperaturas máximos e mínimos e os fluxos térmicos provocados pelo seu funcionamento.

**Palavras-chave:** ENERGIA GEOTÉRMICA SUPERFICIAL; CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE SOLOS; *HOT WIRE METHOD*; MODELAÇÃO NUMÉRICA.

---



# ***Abstract***

---

The rising awareness revealed by the societies, in the last few years, regarding the energetic sustainability of the planet, has become the main driver for the development of new techniques to explore energy that contribute to a decrease in greenhouse gases emission.

Shallow Geothermal Energy (SGE) is one kind of the so called green energy, used for heating and cooling of buildings. In the last decades, on several countries, this technology has shown to be highly efficient and of high applicability. The conventional systems, open and closed loops, were followed by thermoactive foundation structures, with Switzerland and Austria as pioneers, first using slabs and later, around 1984, piles.

The efficiency of Ground Energy Systems (GES) is related with the capacity that the soil presents to provide or sink heat. As such, it becomes of great importance to acquire knowledge about the soil's thermal properties, as a direct way of evaluate the thermal flow and model the soil-structure energy exchanges. GES performance and efficiency in Portugal's specific conditions is yet to be evaluated. Deeper studies are necessary regarding these systems, being the soil's thermal properties a key factor in asserting the GES performance.

This dissertation aims at the study of the different techniques of soil characterization and its importance in the obtained heat flows. A practical case study of a soil is presented, with the thermal characterization and later numerical modeling of a thermoactive structure, determining the heat flows that come from its operation.

**Keywords:** SHALLOW GEOTHERMAL ENERGY; SOIL THERMAL CHARACTERIZATION; HOT WIRE METHOD; NUMERICAL ANALYSIS.

---



# Índice geral

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>IX</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XI</b>
<b>ÍNDICE GERAL .....</b>	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>XVII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>XXIII</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....</b>	<b>XXV</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Considerações gerais .....	1
1.2. Objectivos e estrutura da dissertação.....	5
<b>2. SISTEMAS GEOTÉRMICOS DE BAIXA ENTALPIA .....</b>	<b>7</b>
2.1. Considerações iniciais.....	7
2.2. Classificação dos recursos geotérmicos.....	7
2.3. Sistemas de Geotérmicos de Baixa Entalpia .....	9
2.3.1. Sistemas abertos .....	11
2.3.2. Sistemas fechados.....	13
<b>3. TRANSFERÊNCIA DE CALOR NOS SOLOS.....</b>	<b>19</b>
3.1. Considerações iniciais.....	19

3.2.	Solos: grandezas básicas.....	20
3.2.1.	Propriedades índice .....	20
3.2.2.	Propriedades hidrogeológicas .....	22
3.3.	Mecanismos de transferência de calor .....	23
3.3.1.	Condução .....	23
3.3.2.	Convecção.....	26
3.3.3.	Radiação .....	27
3.3.4.	Outros mecanismos de transferência de calor nos solos .....	28
<b>4.</b>	<b>PROPRIEDADES TÉRMICAS DO SOLO (CONDUÇÃO) .....</b>	<b>29</b>
4.1.	Considerações iniciais.....	29
4.2.	Condutividade térmica.....	29
4.3.	Resistividade térmica .....	33
4.4.	Capacidade térmica .....	33
4.4.1.	Calor específico ou capacidade térmica mássica.....	33
4.4.2.	Capacidade térmica volumétrica .....	36
4.5.	Difusividade térmica.....	37
<b>5.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DE SOLOS .....</b>	<b>41</b>
5.1.	Considerações iniciais.....	41
5.2.	Métodos empíricos.....	41
5.2.1.	Estimação da condutividade térmica .....	42
5.3.	Ensaio de laboratório para determinação da condutividade térmica .....	54
5.3.1.	Regime estacionário .....	55
5.3.2.	Regime variável .....	63
5.4.	Ensaio de laboratório para determinação do calor específico .....	68
5.5.	Ensaio <i>in situ</i> .....	70
5.5.1.	Testes de Resposta Térmica (TRT).....	71
<b>6.</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO EM LABORATÓRIO DE UM SOLO PELO <i>HOT WIRE METHOD</i> .....</b>	<b>77</b>
6.1.	Considerações iniciais.....	77
6.2.	Método e metodologia de ensaio.....	77
6.2.1.	Base teórica.....	77
6.2.2.	Descrição do Sistema de Ensaio .....	79
6.3.	Caracterização térmica: procedimento e resultados obtidos .....	85
6.3.1.	Etapa I-calibração do termopar .....	85
6.3.2.	Etapa II-Characterização com um Material de Referência .....	86
6.3.3.	Etapa III-caracterização geotécnica do solo .....	91
6.3.4.	Etapa IV-caracterização térmica do solo.....	93
6.4.	Apreciação dos resultados .....	99

<b>7. MODELAÇÃO NUMÉRICA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NO SOLO .....</b>	<b>101</b>
7.1. Condições iniciais: definição do modelo numérico .....	101
7.2. Distribuição de temperaturas sem estrutura termoactiva.....	103
7.3. Distribuição de temperaturas com uma estrutura termoactiva .....	110
7.3.1. Perfis verticais de temperatura .....	112
7.3.2. Perfis horizontais de temperatura .....	117
7.3.3. Campos de temperatura máxima e mínima .....	119
7.3.4. Fluxos de calor.....	122
7.4. Apreciação dos resultados .....	125
<b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>127</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>131</b>





# Índice de figuras

Figura 1.1 (A) Forma final da energia consumida na europa dos 27 e (B) distribuição do calor consumido em toda a europa por fim .....	2
Figura 1.2 Utilização Energia Geotérmica na Europa, capacidade instalada por país .....	3
Figura 1.3 Investimento total em sistemas de energia geotérmica EGC 2013.....	3
Figura 1.4 Potencial para o aquecimento na Europa através de sistemas geotérmicos.....	4
Figura 2.1 Classificação para recursos geotérmicos A) Muffler e Cataldi, B) Hochestein, C) Bendritter e Cormy, D) Nicholson, E) Axeisson e Gunnlaugsson e F) Sanyal.....	8
Figura 2.2 Classificação genérica para os sistemas geotérmicos de baixa entalpia .....	9
Figura 2.3 Sistema aberto captação-re-injecção com bomba de calor .....	12
Figura 2.4 Sistemas fechado (A) vertical e (B) horizontal com GCHP .....	13
Figura 2.5 Permutadores em <i>slinky</i> .....	14
Figura 2.6 Configurações fundamentais para os BHE: <i>U-pipe</i> (esquerda) <i>Coaxial</i> (direita) (2002) .....	15
Figura 2.7 Peça utilizada para união do trecho descendente e ascendente de um tubo permutador do tipo <i>U-pipe</i> .....	15
Figura 2.8 (A) Tubos permutadores de calor solidarizados à armadura de uma parede moldada e (B) zona de entrada dos permutadores de calor numa laje de fundo .....	16
Figura 2.9 (A) Armadura de uma estrutura termoactiva com tubos permutadores de calor (B) esquema de uma estaca termoactiva com utilização de <i>triple U-pipes</i> .....	17

Figura 2.10 (A) Detalhe do geocompósito termoactivo instalado no <i>Lainzer Tunnel</i> , trecho LT22 do metro de Viena; (B) Tubos permutadores de calor instalados no <i>invert</i> do <i>Lainzer Tunnel</i> , estação <i>Taborstraße</i> linha U2 (metro de Viena).....	18
Figura 3.1 Modelo conceptual do solo .....	19
Figura 3.2 Fluxo de água subterrâneo em redor de um BHE .....	22
Figura 3.3 Esquema de vector fluxo de calor para o caso tridimensional .....	24
Figura 4.1 Fluxo de calor numa rocha e num solo seco e saturado.....	31
Figura 4.2 Variação da condutividade térmica com o grau de saturação.....	32
Figura 4.3 Relação entre a difusividade térmica e o teor em água para um solo arenoso e outro argiloso .....	39
Figura 5.1 Variação da condutividade térmica com a porosidade de uma areia de quartzo puro e $S_r = 0\%$ , com base nos métodos da média aritmética, geométrica e harmónica.....	43
Figura 5.2 Esquematização do elemento cubico de solo, a) volume unitário de solo, b) sistema de esferas dispostas segundo camadas, horizontais, c) ligações em paralelo segundo a direcção horizontal e em série segundo a direcção vertical .....	48
Figura 5.3 Número de ligações em paralelo como função do grau de saturação $S_r$ .....	49
Figura 5.4 (A) Elemento de solo e (B) Elemento de solo visto segundo o plano $xy$ .....	52
Figura 5.5 Secção diagonal do elemento de solo .....	53
Figura 5.6 - Esquema de dispositivo <i>GHP</i> modelo <i>Dynatech TCFG-R4-6</i> .....	56
Figura 5.7 Esquema da configuração do HFMA: (A) configuração assimétrica com um provete, (B) configuração simétrica e (C) configuração simétrica com dois provetes .....	58
Figura 5.8 Esquema em corte de um dispositivo GCLHFT.....	61
Figura 5.9 Valores aproximados de condutividade térmica para alguns dos possíveis materiais de calibração .....	62
Figura 5.10 (A) Esquema de um dispositivo HWM (vista em planta) e (B) esquema do circuito eléctrico .....	63
Figura 5.11 Principais componentes constituintes de uma sonda térmica .....	65
Figura 5.12 Sonda múltipla .....	65
Figura 5.13 Sonda multifuncional .....	66
Figura 5.14 <i>Transient plane source</i> instalada entre dois provetes de gnaiss .....	68

Figura 5.15 Calorímetro ideal .....	69
Figura 5.16 Gráfico típico de um ensaio realizado pelo método das misturas .....	69
Figura 5.17 Esquema ilustrativo da configuração de um TRT .....	72
Figura 5.18 Output típico de um ensaio TRT .....	74
Figura 6.1 Gráfico tipo para um ensaio térmico pelo HWM .....	79
Figura 6.2 Dispositivo utilizado para realização dos ensaios na ESTIG-IPBeja .....	80
Figura 6.3 Unidade de aquecimento utilizada .....	81
Figura 6.4 (A) Pormenor de uma das uniões do termopar e (B) esquema do termopar utilizado .....	82
Figura 6.5 Calorímetro utilizado para colocação da referência em gelo fundente .....	82
Figura 6.6 (A) Câmara de ensaio aço inoxidável e (B) câmara de ensaio acrílico .....	83
Figura 6.7 Recta de Calibração do Termopar T utilizado .....	85
Figura 6.8 Variação da condutividade térmica da glicerina pura com o teor em água para três temperaturas de ensaio distintas.....	86
Figura 6.9 (A) Câmara de ensaio e (B) recipiente com rótulo da glicerina ensaiada .....	87
Figura 6.10 Variação de temperatura para o ensaio nº8 realizado na câmara de ensaio em inox.....	89
Figura 6.11 Evolução da temperatura durante o ensaio nº8 realizado na câmara de aço inox.....	89
Figura 6.12 Pormenor dos grãos constituintes da areia ensaiada .....	92
Figura 6.13 Curva granulométrica do solo estudado.....	92
Figura 6.14 (A) Câmara de ensaio parcialmente preenchida com areia e (B) colocação da areia seca .....	94
Figura 6.15 (A) Câmara de ensaio totalmente preenchida e (B) pormenor do contacto entre o fio proveniente da fonte de energia e o fio de constantan (unidade de aquecimento) .....	94
Figura 6.16 Variação de temperatura para o ensaio nº1 (areia seca) .....	96
Figura 6.17 Evolução da temperatura durante o ensaio nº1 (areia seca) .....	96
Figura 6.18 Variação de temperatura para o ensaio nº2 (areia húmida $\omega = 9,8\%$ ) .....	98
Figura 6.19 Evolução da temperatura durante o ensaio nº2 (areia húmida $\omega = 9,8\%$ ).....	99
Figura 7.1 Malha de elementos finitos utilizada .....	102
Figura 7.2 Variação anual de temperatura para três cidades portuguesas .....	103
Figura 7.3 Oscilação anual de temperatura para Lisboa, Porto e Beja durante quatro anos .....	105

Figura 7.4 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Lisboa ( $Sr=0$ ) .....	105
Figura 7.5 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Lisboa ( $Sr=1$ ) .....	106
Figura 7.6 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Porto ( $Sr=0$ ) .....	106
Figura 7.7 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Porto ( $Sr=1$ ) .....	107
Figura 7.8 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Beja ( $Sr=0$ ) .....	107
Figura 7.9 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Beja ...	108
Figura 7.10 Perfis de temperatura máxima e mínima do solo nas condições de $Sr = 0$ .....	109
Figura 7.11 Perfis de temperatura máxima e mínima do solo nas condições de $Sr = 0$ .....	109
Figura 7.12 Geometria do problema ( <i>escala 1:500</i> ) .....	110
Figura 7.13 Oscilação da temperatura na estaca e à superfície para o intervalo de tempo de quatro anos .....	112
Figura 7.14 Perfis de temperatura do solo seco para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E1 e acção térmica AT1 .....	113
Figura 7.15 Perfis de temperatura do solo saturado para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E1 e acção térmica AT1 .....	113
Figura 7.16 Perfis de temperatura do solo seco para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E2 e acção térmica AT1 .....	114
Figura 7.17 Perfis de temperatura do solo saturado para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E2 e acção térmica AT1 .....	114
Figura 7.18 Perfis de temperatura do solo seco, para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E1 e acção térmica AT2 .....	115
Figura 7.19 Perfis de temperatura do solo saturado para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E1 e acção térmica AT2 .....	115
Figura 7.20 Perfis de temperatura do solo seco para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E2 e acção térmica AT2 .....	116

Figura 7.21 Perfis de temperatura do solo saturado para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E2 e acção térmica AT2 .....	116
Figura 7.22 Perfil horizontal de temperatura para todas as situações analisadas e acção térmica AT1 .....	117
Figura 7.23 Perfil horizontal de temperatura para todas as situações analisadas e acção térmica AT2 .....	118
Figura 7.24 Acção térmica AT1 ( <i>escala 1:300</i> ): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo seco para a estaca E1 .....	119
Figura 7.25 Acção térmica AT1 ( <i>escala 1:300</i> ): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo saturado para a estaca E1 .....	119
Figura 7.26 Acção térmica AT1 ( <i>escala 1:300</i> ): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo seco para a estaca E2 .....	120
Figura 7.27 Acção térmica AT1 ( <i>escala 1:300</i> ): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo saturado para a estaca E2 .....	120
Figura 7.28 Acção térmica AT2 ( <i>escala 1:300</i> ): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo seco para a estaca E1 .....	121
Figura 7.29 Acção térmica AT2 ( <i>escala 1:300</i> ): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo saturado para a estaca E1 .....	121
Figura 7.30 Acção térmica AT2 ( <i>escala 1:300</i> ): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo seco para a estaca E2 .....	121
Figura 7.31 Acção térmica AT2 ( <i>escala 1:300</i> ): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo saturado para a estaca E2 .....	122
Figura 7.32 Taxa de transferência de calor para a acção térmica AT1 .....	123
Figura 7.33 Taxa de transferência de calor para a acção térmica AT2 .....	124



## Índice de tabelas

Tabela 3.1 Definição das grandezas básicas descritivas do estado físico dos solos .....	21
Tabela 4.1 Condutividades térmicas de diferentes minerais, água e ar .....	30
Tabela 4.2 Condutividade térmica de alguns solos segundo a norma alemã VDI.....	32
Tabela 4.3 Calor específico de alguns solos determinado com base nos valores apresentados na norma alemã VDI 4640 .....	34
Tabela 4.4 Valores de calor específico para os diferentes constituintes do solo.....	35
Tabela 4.5 Capacidade térmica volumétrica de alguns solos segundo a norma alemã VDI 4640 .....	36
Tabela 4.6 Difusividade térmica para diferentes tipos de solos, determinada com base nos valores de condutividade térmica e capacidade térmica volumétrica disponíveis na norma alemã VDI 4640.....	38
Tabela 5.1 Variação do meio fluido em função do tipo de solo e teor em água crítico .....	44
Tabela 5.2 Valores de $\kappa$ para os diferentes tipos de solo .....	50
Tabela 5.3 Valores de $\chi$ e $\eta$ para os diferentes tipos de solos .....	50
Tabela 5.4 Valores dos parâmetros $\alpha_1$ e $\beta$ para os diferentes tipos de solos.....	51
Tabela 6.1 Características da unidade de aquecimento.....	81
Tabela 6.2 Dimensões, volume e massa das câmaras de ensaio utilizadas.....	84
Tabela 6.3 Propriedades térmicas das câmaras de ensaio .....	84
Tabela 6.4 Valores lidos de diferença de potencial e intensidade de corrente e a respectiva potência obtida analiticamente .....	88
Tabela 6.5 Condutividade térmicas obtidas para os diferentes ensaios realizados em ambas as câmaras.....	88
Tabela 6.6 Tipo de ensaios realizados .....	91



Tabela 6.7 Coeficientes de curvatura e uniformidade do solo .....	93
Tabela 6.8 Valores lidos de diferença de potencial e intensidade de corrente e a respectiva potência obtida analiticamente para os ensaios em solo seco .....	95
Tabela 6.9 Resultados obtido para a condutividade térmica do solo seco .....	95
Tabela 6.10 Valores lidos de diferença de potencial e intensidade de corrente e respectiva potência obtida analiticamente para os ensaios em solo com diferentes teores em água.....	97
Tabela 6.11 Resultados obtidos para a condutividade térmica do solo com diferentes teores em água .....	97
Tabela 7.1 Parâmetros climatológicos para três cidades portuguesas .....	102
Tabela 7.2 Propriedades base utilizadas nos cálculos numéricos .....	104
Tabela 7.3 Características geométricas das estacas modeladas .....	111
Tabela 7.4 Características do betão utilizado no estudo numérico.....	111
Tabela 7.5 Parâmetros utilizados para a definição da acção térmica imposta pela estaca .....	112
Tabela 7.6 Parâmetros utilizados para definição das funções taxa de transferência de calor para AT1 .....	123
Tabela 7.7 Parâmetros utilizados para definição das funções taxa de transferência de calor para AT1 .....	123
Tabela 7.8 Quantidades totais de energia transferida .....	124

# Lista de símbolos e abreviaturas

## Abreviaturas

AASHTO	<i>American Association for State Highway and Transportation Officials</i>
ADENE	<i>Agência para a Energia</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AT1	<i>Acção térmica 1</i>
AT2	<i>Acção térmica 2</i>
ATES	<i>Aquifer Thermal Energy Storage</i>
BHE	<i>Borehole heat exchanger</i>
BTES	<i>Borehole Thermal Energy Storage</i>
COL	<i>Convencional open loop system</i>
CSM	<i>Cylindrical Source Model</i>
EGC	<i>European Geothermal Congress</i>
EGEC	<i>European Geothermal Energy Council</i>
EGS	<i>Enhanced Geothermal Systems</i>
FDM	<i>Método das diferenças finitas</i>
GCHP	<i>Ground coupled heat pump</i>
GCLHFT	<i>Guarded Comparative Longitudinal Heat Flow Technique</i>
GES	<i>Ground Energy System</i>
GHE	<i>Ground Heat Exchanger</i>
GHP	<i>Guarded Hot Plate</i>

GRT	Geothermal Response Test
GSHP	Ground source heat pump
GWHP	Groundwater heat pump
HFMA	Heat Flow Meter Apparatus
HWM	Hot Wire Method
IAT	Indústria de Alta Temperatura
IBT	Indústria de Baixa Temperatura
IEA	International Energy Agency
ISO	International Standard Organization
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LSM	Line Source Model
MAR	Maximum $R^2$ Method
RHC	European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling
SC	Standing Column System
SGE	Shallow Geothermal Energy
TPS	Transient Plane Source
TRT	Thermal Response Test
USGS	United States Geological Survey
UTES	Underground Thermal Energy Storage
VDI	Associação Alemã de Engenheiros

### **Simbolos**

$\omega$	Teor em água	%
$\chi$	Factor dependente das partículas sólidas	$W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
$\rho$	Massa volúmica	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho$	Massa volúmica do ar	$kg \cdot m^{-3}$
$\lambda$	Condutividade térmica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\kappa$	Parâmetro dependente do tipo de solo	-
$\eta$	Factor dependente das partículas sólidas	-
$\delta$	Incerteza de medição	-

$\gamma$	Constante de Euler	-
$\beta$	Factor dependente da textura do solo	-
$\alpha$	Difusividade térmica	$m \cdot s^{-2}$
$\Delta x$	Distância entre dois pontos segundo a direcção $x$	$m$
$\Delta t$	Intervalo de tempo	$s$
$\Delta T$	Diferença de temperatura	$K$
$\Delta T_s$	Amplitude térmica à superfície	$^{\circ}C$
$\Delta T_{estaca}$	Amplitude do carregamento térmico	$^{\circ}C$
$\Delta \dot{Q}$	Amplitude da função taxa de transferência de calor	$W$
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Gradiente térmico na direcção $x$	$K \cdot m^{-1}$
$\frac{\partial T}{\partial n}$	Gradiente de temperatura nas três direcções do espaço	$K \cdot m^{-1}$
$\omega_{\rho}$	Teor em água em função da massa volúmica seca	%
$\omega_{sat}$	Teor em água saturado	%
$\omega_{crit}$	Teor em água crítico	%
$\rho_{org}$	Massa volúmica da fracção orgânica do solo	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho_{org,max}$	Valor máximo de massa volúmica para a fracção orgânica	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho_d$	Massa volúmica seca	$kg \cdot m^{-3}$
$\rho_a$	Massa volúmica da água	$kg \cdot m^{-3}$
$\lambda_w$	Condutividade térmica da água	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{sat}$	Condutividade térmica no estado saturado	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_s$	Condutividade térmica fracção sólida	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{qz}$	Condutividade térmica do quartzo	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{org}$	Condutividade térmica da fracção orgânica	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_o$	Condutividade térmica do meio fluido contínuo	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{minerais}$	Condutividade térmica genérica para a fracção mineral do solo (sem quartzo)	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{méd}$	Condutividade térmica média	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_l$	Condutividade térmica fracção líquida	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_i$	Condutividade térmica da fracção $i$	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_g$	Condutividade térmica fracção gasosa	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{est}$	Condutividade térmica estimada	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

$\lambda_{est}$	Condutividade térmica estimada	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{eff}$	Condutividade térmica efectiva	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_d$	Condutividade térmica no estado seco	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{d,o}$	Condutividade térmica da fracção orgânica no estado seco	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{d,m}$	Condutividade térmica da fracção mineral no estado seco	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_{cal}$	Condutividade térmica da barra de medição	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\lambda_a$	Condutividade térmica do ar	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
$\varepsilon_t$	Diferença de fase	s
$\gamma_w$	Peso volúmica água	$kN \cdot m^{-3}$
$\gamma_s$	Peso volúmico das partículas sólidas	$kN \cdot m^{-3}$
$\gamma_d$	Peso volúmico seco	$kN \cdot m^{-3}$
$\gamma_h$	Peso volúmico	$kN \cdot m^{-3}$

### **Letras**

$A$	Área de uma secção	$m^2$
$C$	Capacidade térmica	$J \cdot K^{-1}$
$C_c$	Coeficiente de curvatura	-
$C_u$	Coeficiente de uniformidade	-
$C_{v,fluido}$	Capacidade térmica volumétrica do fluido de transporte de energia térmica	$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
$C_{v,a}$	Capacidade térmica volumétrica do ar	$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
$C_{v,o}$	Capacidade térmica volumétrica da matéria orgânica	$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
$C_{v,solo}$	Capacidade térmica volumétrica do solo	$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
$C_{v,w}$	Capacidade térmica volumétrica da água	$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
$C_v$	Capacidade térmica volumétrica	$kJ \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
$c$	Calor específico	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_a$	Calor específico do ar	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{ort}$	Calor específico da ortoclase	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_s$	Calor específico dos sólidos	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$

$c_{solo,d}$	Calor específico do solo seco	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{solo,h}$	Calor específico do solo húmido	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_{solo,sat}$	Calor específico do solo saturado	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$c_w$	Calor específico da água	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
$D$	Diâmetro da estaca	mm
$d$	Espessura média do provete	m
$E_{sistema}$	Energia interna do sistema	J
$e$	Índice de vazios	-
$e_h$	Tensão de saída do fluxímetro	-
$F$	Caudal que circula no BHE	$m^3 \cdot s^{-1}$
$f$	Factor de calibração do fluxímetro	-
$f_k$	Percentagem de uma fracção constituinte do solo num dado volume unitário	%
$G$	Densidade das partículas sólidas	W
$g_{i,ar}$	Factor de forma para os interstícios preenchidos por ar	-
$g_i$	Factor de forma das partículas para o modelo de De Vries	-
$H$	Comprimento do furo permutador de calor	$W \cdot m^{-2}$
$h_c$	Condutância térmica	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
$I$	Intensidade de corrente	A
$K_e$	Condutividade térmica normalizada (Número de Kersten)	-
$L$	Comprimento da estaca	m
$L_s$	Calor de fusão	$kJ \cdot kg^{-1}$
$L_v$	Calor latente de vaporização	$kJ \cdot kg^{-1}$
$l_a$	Comprimento da unidade de aquecimento	m
$m$	Massa	kg
$n$	Porosidade	-
$\bar{P}$	Período de oscilação	s
$P$	Potência dissipada como calor (também designada por $\dot{Q}$ na lei de Joule)	$W \cdot m^2$

$P(a = a_j)$	Probabilidade de ocorrência de um dado arranjo $a_j$	-
$p$	Percentagem de argila no solo	%
$Q$	Quantidade total de energia térmica transferida	J
$\dot{Q}$	Taxa de transferência de calor	W
$\dot{Q}_{med}$	Taxa média de transferência de calor	W
$Q_s$	Calor necessário para que exista fusão	J
$Q_v$	Calor necessário para que exista vaporização	J
$\dot{q}$	Fluxo de calor	$W \cdot m^{-2}$
$\dot{q}_{base}$	Fluxo de calor na barra de medição da base	$W \cdot m^{-2}$
$\dot{q}_{conv,a}$	Fluxo de calor por convecção na fase gasosa	$W \cdot m^{-2}$
$\dot{q}_{conv,l}$	Fluxo de calor por convecção na fase líquida	$W \cdot m^{-2}$
$\dot{q}_{rad}$	Fluxo de calor por radiação	$W \cdot m^{-2}$
$\dot{q}_{solo}$	Fluxo de calor (ou potência dissipada) para o solo	$W \cdot m^{-2}$
$\dot{q}_{topo}$	Fluxo de calor na barra de medição do topo	$W \cdot m^{-2}$
$\dot{q}_{total}$	Fluxo total de calor que atravessa o elemento de solo para o modelo de Gori e Corasaniti	$W \cdot m^{-2}$
$R^2$	Coeficiente de determinação	-
$R_1$	Raio da partícula sólida para o modelo de Gori e Corasaniti	mm
$R_2$	Raio do volume de água esférico para o modelo de Gori e Corasaniti	mm
$R_b$	Resistência térmica do furo	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$R_{th}$	Resistência térmica	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$R_{th}$	Resistência térmica total	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
$R_s$	Resistência eléctrica	$\Omega$
$r$	Resistividade térmica	$m \cdot K \cdot W^{-1}$
$r_a$	Distância à unidade de aquecimento	m
$r_{ij}$	Raio da partícula na posição (i,j) no modelo de Usowicz	m
$r_o$	Raio interno do tubo permutador de calor	m
$S$	Declive da recta de ajuste por regressão linear	-

$S_r$	<i>Grau de saturação</i>	-
$T$	<i>Temperatura</i>	<i>K ou °C</i>
$T_0$	<i>Temperatura de referência</i>	<i>K</i>
$T_1$	<i>Temperatura no instante <math>t_1</math></i>	<i>°C</i>
$T_2$	<i>Temperatura no instante <math>t_2</math></i>	<i>°C</i>
$T_{cal}$	<i>Temperatura do calorímetro antes da mistura</i>	<i>°C</i>
$T_d$	<i>Temperatura do solo antes de entrar no Dewar</i>	<i>°C</i>
$T_{fluido}$	<i>Temperatura do fluido de transporte de energia térmica</i>	<i>K</i>
$T_{fria}$	<i>Temperatura média da placa fria</i>	<i>K</i>
$T_h$	<i>Temperatura do solo húmido</i>	<i>°C</i>
$T_i$	<i>Temperatura medida na posição <math>Z_i</math> (com <math>i = 1, 2, 3, 4, 5</math> e <math>6</math>)</i>	<i>K</i>
$T_{in}$	<i>Temperatura do fluido à entrada do BHE</i>	<i>°C</i>
$T_{m,estaca}$	<i>Temperatura média na estaca</i>	<i>°C</i>
$T_m$	<i>Temperatura média anual à superfície</i>	<i>°C</i>
$T_{natural}$	<i>Temperatura não perturbada do solo</i>	<i>°C</i>
$T_{out}$	<i>Temperatura do fluido à saída do BHE</i>	<i>°C</i>
$T_{quente}$	<i>Temperatura média da placa quente</i>	<i>K</i>
$t$	<i>Tempo</i>	<i>s</i>
$t_h$	<i>Duração da fase de aquecimento</i>	<i>s</i>
$t_{min}$	<i>Intervalo de tempo mínimo de ensaio</i>	<i>s</i>
$U$	<i>Diferença de potencial</i>	<i>V</i>
$u$	<i>Número de ligações no modelo de Usowicz</i>	-
$V$	<i>Volume total de solo</i>	<i>m<sup>3</sup></i>
$V_c$	<i>Volume da câmara de ensaio</i>	<i>m<sup>3</sup></i>
$V_s$	<i>Volume de partículas sólidas</i>	<i>m<sup>3</sup></i>
$V_v$	<i>Volume de vazios</i>	<i>m<sup>3</sup></i>
$V_w$	<i>Volume de água</i>	<i>m<sup>3</sup></i>



$\vec{v}_g$	Vector velocidade de fluxo de calor por convecção na fracção gasosa (ar)	$m \cdot s^{-1}$
$\vec{v}_w$	Vector velocidade de fluxo de calor por convecção na fracção líquida (água)	$m \cdot s^{-1}$
$W_c$	Massa da câmara de ensaio	kg
$W_{cal}$	Massa do calorímetro e fluido calorimétrico	k
$W_s$	Massa das partículas sólidas	kg
$W_{solo,d}$	Massa do solo seco	kg
$W_{solo,h}$	Massa do solo húmido	kg
$W_t$	Massa do conjunto câmara de ensaio-solo	kg
$W_w$	Massa de água	kg
$x_a$	Fracção volumétrica de ar	-
$x_{areia}$	Fracção volumétrica de areia	-
$x_{argila}$	Fracção volumétrica de argila	-
$x_i$	Fracção volumétrica $i$	-
$x_{org}$	Fracção volumétrica de matéria orgânica	-
$x_{ort}$	Fracção volumétrica de ortoclase	-
$x_{qz}$	Fracção volumétrica de quartzo	-
$x_s$	Fracção volumétrica de sólidos	-
$x_w$	Fracção volumétrica de água	-
$Z_i$	Posição do termopar (com $i = 1, 2, 3, 4, 5$ e $6$ )	-
$z$	Profundidade	m
$z_a$	Factor de ponderação da fracção de água para o modelo de De Vries	-
$z_i$	Factor de ponderação da fracção $i$ para o modelo de De Vries	-
$z_n$	Factor de ponderação genérico para o modelo de De Vries	-
$z_w$	Factor de ponderação da fracção de ar para o modelo de De Vries	-

*"While the earth remaineth,  
seedtime and harvest, cold and heat  
Summer and Winter,  
and day and night shall not cease."  
-Genesis 8:22*

# 1. Introdução

## 1.1. Considerações gerais

A caracterização térmica de solos é necessária para diversas aplicações em diferentes domínios, nomeadamente na construção de rodovias, *pipeline*, cabos enterrados e vários outros tipos de estruturas e infra-estruturas (Farouki, 1981). Para além destas aplicações, o estudo das propriedades térmicas dos solos ocupa lugar de destaque nas áreas da agronomia, meteorologia e geologia. Mais recentemente, esta temática tem encontrado espaço no domínio dos recursos geotérmicos de baixa entalpia, em particular no seu aproveitamento para climatização, através de sistemas com bombas de calor (*Ground Source Heat Pumps – GSHP*). A utilização deste tipo de dispositivos é uma realidade presente em diversos países, sendo implementada para climatização de habitações uni e multifamiliares, escritórios de grande e pequena dimensão e infra-estruturas subterrâneas de que são exemplo as estações de metropolitano (Lund *et al.*, 2011; Omer, 2008; RETSreen International, 2005). Esta tecnologia além de apresentar aplicabilidade nas áreas referidas anteriormente, encontra também espaço no sector agro-pecuário, para climatização de estufas ou aviários, nas pescas, em unidades de piscicultura e no sector industrial dos têxteis e do vinho (Madureira e Antunes, 2012).

A Energia Geotérmica Superficial (*Shallow Geothermal Energy – SGE*), utilizada para aquecimento e arrefecimento, recorre frequentemente a bombas de calor. Estes dispositivos foram inicialmente idealizados por Lord Kelvin em 1852 (Johnston *et al.*, 2011) tendo mais tarde R. Webber, na década de 40, instalado a primeira bomba de calor para fins geotérmicos numa habitação. No início dos anos 80, foram pela primeira vez utilizadas em estruturas de fundação para captação e introdução de calor no solo. A Suíça e Áustria foram os países pioneiros onde se iniciou a exploração através de lajes de fundo. Em 1984 o princípio de estrutura termoactiva ou geotermoactiva começa a ser utilizadas em estacas, tendo em 1996 sido alargado às paredes moldadas, verificando-se daí em diante um crescimento significativo na utilização de estruturas de fundação para captação e injeção de calor nos solos (Brandl, 2006).

No seguimento das crescentes preocupações mundiais no que concerne à sustentabilidade energética do planeta, foi possível desenvolver em alguns países Sistemas Geotérmicos de Baixa

Entalpia (GES—*Ground Energy Systems*) mais eficientes, que permitem hoje a exploração dos recursos geotérmicos superficiais de forma mais eficaz. Self *et al.* (2013) referem os EUA, a Alemanha, a Suíça, a Suécia e a Austrália como os líderes actuais no aproveitamento da SGE através da utilização de GSHP. Segundo os autores, outros países como o Reino Unido, a Noruega, a Dinamarca, a China, a Argentina e o Chile têm vindo a investir neste tipo de tecnologias.

De acordo com a *European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling* (RHC) (2011), no ano de 2007, cerca de 48% da energia eléctrica consumida em toda a Europa dos 27 teve como finalidade a produção de energia térmica, dos quais 56% foram utilizados em habitações e serviços (S) e os restantes 44% na indústria de alta (IAT) e baixa temperatura (IBT) (Figura 1.1).

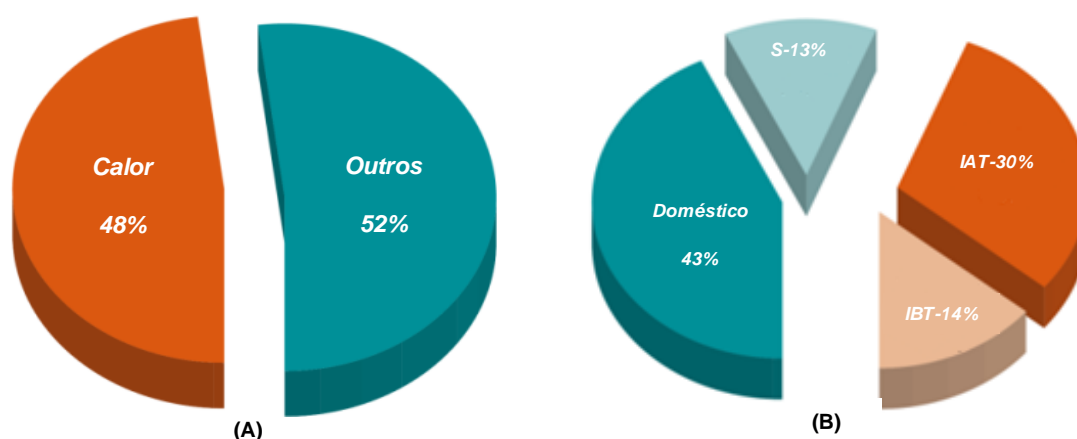


Figura 1.1 (A) Forma final da energia consumida na europa dos 27 e (B) distribuição do calor consumido em toda a europa por fim, adaptado de RHC (2011)

Em Portugal o sector doméstico foi responsável em 2010 pelo consumo de 14,442GW·h, o que em termos percentuais representa cerca de 30% de toda a energia eléctrica consumida no país (ADENE, 2013). A climatização representa em regra cerca de 11% do consumo total realizado numa habitação em Portugal, o que no ano de 2010 representou aproximadamente 1,5GW·h gastos.

Segundo dados da RHC (2011), em 2011 a produção de energia geotérmica na Europa para climatização foi de 24 GW<sub>th</sub><sup>1</sup>, sendo a principal fatia proveniente de sistemas onde são incorporadas GSHP. Como se verifica no gráfico apresentado na Figura 1.2, os recursos geotérmicos de baixa entalpia explorados com recurso a GSHP são hoje uma realidade principalmente nos países mais ricos e desenvolvidos da Europa. Dados mais recentes apresentados no Congresso Europeu de Geotermia em Pizza (EGC 2013), permitem afirmar que a energia geotérmica de baixa entalpia, especialmente os sistemas superficiais onde são utilizadas GSHP, são de longe o sector mais importante no que se refere ao aproveitamento dos recursos geotérmicos. Segundo Antics *et al.* (2013), no final de 2012 existiam em toda a Europa perto de 1,3 milhões de instalações do tipo GSHP, correspondentes a uma potência instalada de 17 mil MW<sub>th</sub><sup>2</sup>, tendo naquele ano a produção de energia térmica atingido cerca de 39 mil MW<sub>th</sub>.

<sup>1</sup> Giga Watt térmico

<sup>2</sup> Mega Watt térmico

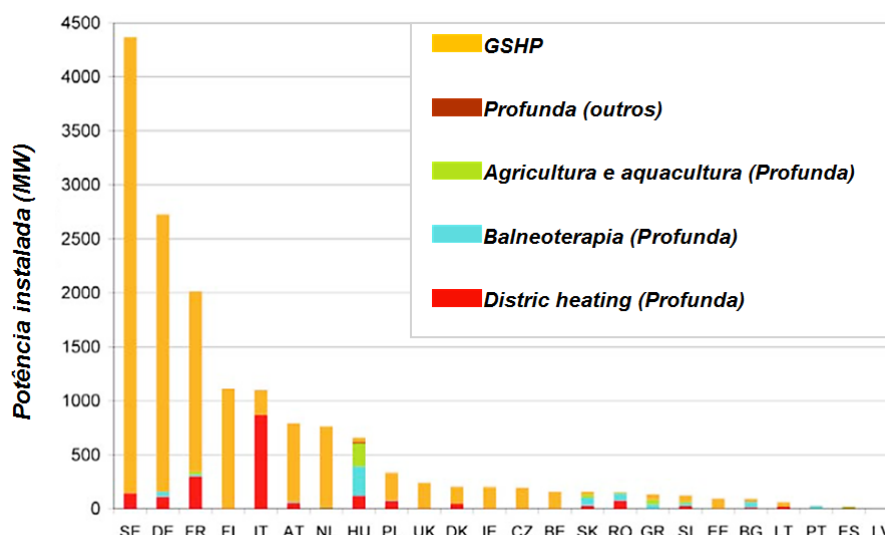


Figura 1.2 Utilização Energia Geotérmica na Europa, capacidade instalada por país, adaptado de European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling (2012)

Actualmente na Europa, países como Suécia, Alemanha, França e Suíça são líderes no que respeita à utilização de calor para climatização, com uma produção de cerca de 64% do total produzido em todo o continente (Antics *et al.*, 2013). Países como Itália, República Checa, Polónia e Finlândia verificaram as maiores taxas de crescimento no aproveitamento dos recursos geotérmicos de baixa entalpia através de GES, designadamente, daqueles que recorrem a GSHP. O investimento total em energia geotérmica foi de pelo menos 5,3 mil milhões de euros em toda a Europa, sendo a maior fatia de investimento direccionada para os sistemas superficiais, onde só a Suécia investiu cerca de 2,5 mil milhões de euros (Figura 1.3).

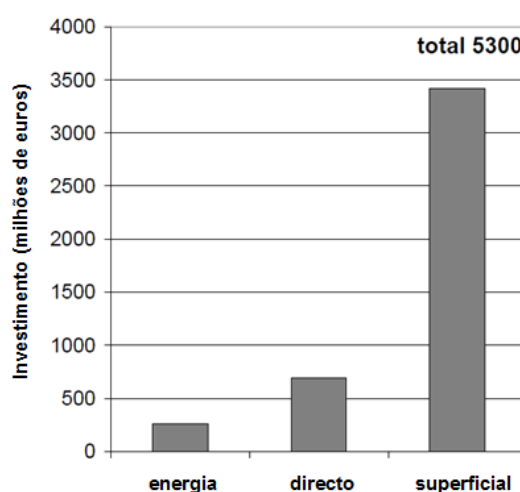
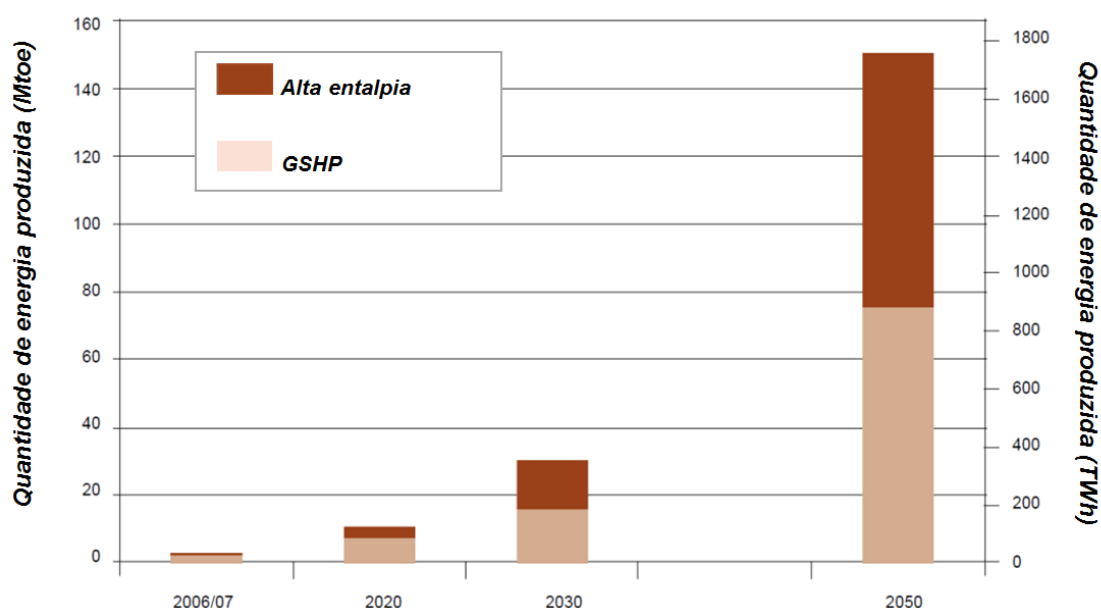


Figura 1.3 Investimento total em sistemas de energia geotérmica EGC 2013, adaptado de Antics *et al.* (2013)

Antics *et al.* (2013) estimam um aumento de cerca de 30% no valor investido em energia geotérmica em 2015. Se tais perspectivas se confirmarem, no referido ano o investimento em sistemas SGE rondará os 7 mil milhões de euros. Previsões quanto à utilização na Europa, realizadas pela RHC

(2011), indicam que em 2020 cerca de 25% da energia térmica consumida será proveniente de fontes renováveis. Em 2050, espera-se que esse valor cresça atingindo os 50%. Quanto à quantidade de energia, a RHC prevê que em 2020, as GSHP forneçam  $14\text{TWh}_{\text{th}}$  e em 2050 cerca de  $48\text{TWh}_{\text{th}}$ .



**Figura 1.4 Potencial para o aquecimento na Europa através de sistemas geotérmicos, adaptado de European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling (2011)**

Em Portugal o aproveitamento dos recursos geotérmicos é realizado no essencial utilizando sistemas de alta entalpia, de onde se destacam os campos geotérmicos da ilha de São Miguel nos Açores. A energia geotérmica aí produzida suporta cerca de 22% do consumo energético total do arquipélago (Antics *et al.*, 2013).

Quanto aos recursos de baixa entalpia, onde as temperaturas de operação são mais reduzidas, são conhecidos no continente casos de aproveitamento directo de fluidos hidrotermais para climatização, de estufas, hotéis e piscinas. São exemplos os casos de São Pedro do Sul, Chaves e Caldas de Chaves, onde os fluidos extraídos apresentam temperaturas superiores a  $50^{\circ}\text{C}$ . Nestes locais é necessária a utilização de furos com profundidades superiores 400m.

Quanto aos sistemas GES contam-se em Portugal alguns projectos onde se utilizam GSHP, de que são exemplo dois edifícios da Universidade de Aveiro, bem como alguns trabalhos de investigação direccionados para a eficiência energética das bombas de calor geotérmico e optimização dos permutadores de calor, de que é exemplo a instalação piloto da Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Setúbal. A crise económica e a forte retracção no domínio da construção que o país atravessa, têm certamente tido repercussões num certo atraso na aplicação destes sistemas, quando se compare com outros países europeus.

Para o dimensionamento de sistemas geotérmicos superficiais é necessário adquirir conhecimento no que se refere ao comportamento térmico dos solos. A resposta destes materiais às acções térmicas que lhe são impostas, condiciona de forma considerável a eficiência de todo o sistema. É por isso

necessário estudar e caracterizar o solo, as suas propriedades geológicas, hidrogeológicas e térmicas.

## **1.2. Objectivos e estrutura da dissertação**

A presente dissertação foi realizada no âmbito de um estágio em regime de acolhimento, no Departamento de Geotecnia do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, ao abrigo de um convénio entre a Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa e o referido laboratório.

O trabalho encontra-se dividido em oito capítulos, sendo este o primeiro onde se faz uma abordagem do tema. O segundo capítulo centra-se na temática dos Sistemas Geotérmicos de Baixa entalpia. Nele são referidos os diferentes tipos de recursos geotérmicos e sua classificação, sendo em seguida abordados, com mais detalhe, os recursos de baixa entalpia. O terceiro capítulo trata da transferência de calor nos solos, com especial ênfase nos mecanismos de transferência de calor por condução, convecção e radiação. No quarto capítulo são abordadas as propriedades térmicas necessárias para a caracterização da transferência de calor por condução. No quinto capítulo é abordada a temática da caracterização térmica dos solos. Apresentam-se alguns dos métodos empíricos mais utilizados, bem como os ensaios de laboratório e *in situ*, existentes para o referido propósito. O sexto capítulo trata do estudo prático em laboratório de um solo arenoso, para o qual foi realizada a caracterização geotécnica e ensaios conducentes à determinação da condutividade térmica. No sétimo capítulo, apresenta-se a modelação numérica de um solo com e sem introdução de uma estrutura termoactiva. Por fim apresenta-se o oitavo capítulo onde se tecem-se as considerações finais e se propõem os trabalhos futuros a realizar.



## **2. Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia**

### **2.1. Considerações iniciais**

Segundo o *European Geothermal Energy Council* (EGEC) a energia geotérmica define-se, como a energia armazenada sob a forma de calor abaixo da superfície terrestre. A *International Energy Agency* (IEA), define este tipo de energia de forma diferente. Para a IEA a energia geotérmica é a energia sob a forma de calor, contida ou descarregada a partir da crosta terrestre, que pode ser utilizada para a produção de energia eléctrica ou aquecimento directo para numerosas aplicações tais como: aquecimento urbano (*district heating*), na aquacultura, na horticultura ou mesmo na indústria. Adicionalmente, considera também como energia geotérmica aquela que é extraída, a temperatura aproximadamente constante, nas zonas mais superficiais da crosta, utilizando para isso bombas de calor (GSHP).

A energia geotérmica convencional utiliza o calor proveniente das zonas mais profundas da crosta terrestre para produção de energia eléctrica. Neste tipo de aproveitamentos a temperatura existente nas zonas de captação de energia térmica é, por vezes, a grande condicionante à viabilidade de implementação dos empreendimentos. Para além da temperatura de operação, outros parâmetros como as condições geológicas do meio, as propriedades intrínsecas dos materiais e a viabilidade económica, são também considerados durante o planeamento de um aproveitamento geotérmico (Williams *et al.*, 2011). A par destes sistemas, outros tipos de concepções de energia geotérmica tem vindo a ser desenvolvidos. Os sistemas de baixa entalpia não incluem a produção de energia eléctrica, utilizando o calor existente na crosta apenas para climatização. As temperaturas de operação são mais reduzidas, sendo o seu âmbito de aplicação menos profundo (<100m) (Johnston *et al.*, 2011).

### **2.2. Classificação dos recursos geotérmicos**

A classificação dos recursos geotérmicos é frequentemente realizada tendo por base a sua temperatura. Segundo o *United States Geological Survey* (USGS) podem ser considerados três



grandes grupos: Recursos de Baixa Temperatura ( $T < 90^{\circ}\text{C}$ ), Recursos de Temperatura Moderada ( $90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$ ) e Recursos de Alta Temperatura ( $T > 150^{\circ}\text{C}$ ). Outras classificações, também baseadas na temperatura têm vindo a ser propostas ao longo do tempo. Igualmente com três níveis as classificações Muffler e Cataldi (1978), Hochstein (1988) e Bendritter e Cormy (1990). Com dois níveis Nicholson (1993) e Axeisson e Gunnlaugsson (1978) e com seis níveis Sanyal (2005) (Figura 2.1). As diferentes fronteiras de temperatura são estabelecidas com base na análise de viabilidade económica da sua eventual exploração.

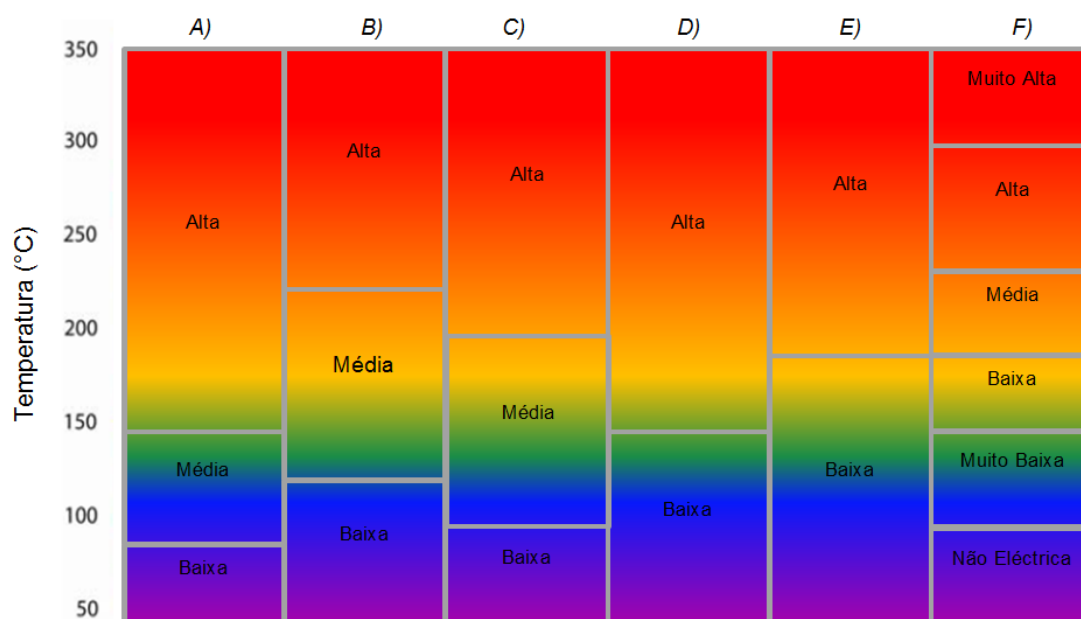


Figura 2.1 Classificação para recursos geotérmicos A) Muffler e Cataldi, B) Hochstein, C) Bendritter e Cormy, D) Nicholson, E) Axeisson e Gunnlaugsson e F) Sanyal, adaptado de Williams *et al.* (2011)

Os sistemas de exploração convencionais de alta entalpia, que tiveram a sua primeira aplicação em 1904 em Larderello (Itália), utilizam o calor proveniente de zonas profundas da crosta para produção de energia eléctrica. O acesso aos reservatórios termais é realizado através de furos que podem atingir profundidades de cerca de 5000m. Nessas regiões, as altas temperaturas possibilitam a ocorrência de fluidos hidrotermais com temperaturas elevadas. Estes são captados através dos furos, colocando em movimento turbinas que permitem a geração de energia eléctrica.

Nos últimos anos têm-se conhecido novos desenvolvimentos nas tecnologias de alta entalpia, designadamente nos Sistemas Geotérmicos Estimulados (*Enhanced Geothermal Systems – EGS*). Segundo Chamorro *et al.* (2014), os EGS são utilizados em maciços rochosos designados como *Hot Dry Rock*. Nestes locais os fluidos hidrotermais são insuficientes e a permeabilidade muito reduzida. Assim, por forma a implementar aproveitamentos geotérmicos, é necessário que se realizem melhorias nas condições de permeabilidade do maciço rochoso, através da abertura de descontinuidades estratigráficas ou estruturais pré-existentes, ou mesmo provocando a fracturação do maciço. Desta forma é possível a injeção de água a partir da superfície no maciço fracturado, que ao percolar nas fracturas, aumenta de temperatura, armazenando energia térmica, sendo novamente captada e utilizada para produção de energia eléctrica. Para Banks (2012) este tipo de

aproveitamentos é especialmente útil em formações graníticas subjacentes a sedimentos recentes com baixa condutividade. Estas em virtude do decaimento radioactivo dos isótopos de urânio, potássio e tório apresentam fluxos térmicos superiores à média, originando anomalias geotérmicas. São inúmeros os casos de EGS em todo o mundo, na Europa foram pioneiros os aproveitamentos de *Soultz-sous-Forêts* em França e *Falkenberg* e *Bad Urach* na Alemanha.

## 2.3. Sistemas de Geotérmicos de Baixa Entalpia

Segundo Powrie e Preene (2009), os sistemas que utilizam a energia térmica proveniente da sub-superfície devem ser designados como *Ground Energy Systems* (GES), designação mais abrangente do que *Ground Source Heat Pumps* (GSHP) ou *Geothermal Systems*, pois as bombas de calor são componentes do sistema de extracção que podem, ou não, ser necessários. O autor considera também desadequada a utilização do termo geotérmico isoladamente pois este, remete para os aproveitamentos geotérmicos convencionais, onde como já referido as temperaturas de operação e profundidades atingidas são muito superiores. Os *Ground Energy Systems*, em português designados como de baixa entalpia, englobam dois grandes grupos, os sistemas abertos (*open loop systems*) e os sistemas fechados (*closed loop systems*) (Figura 2.2).

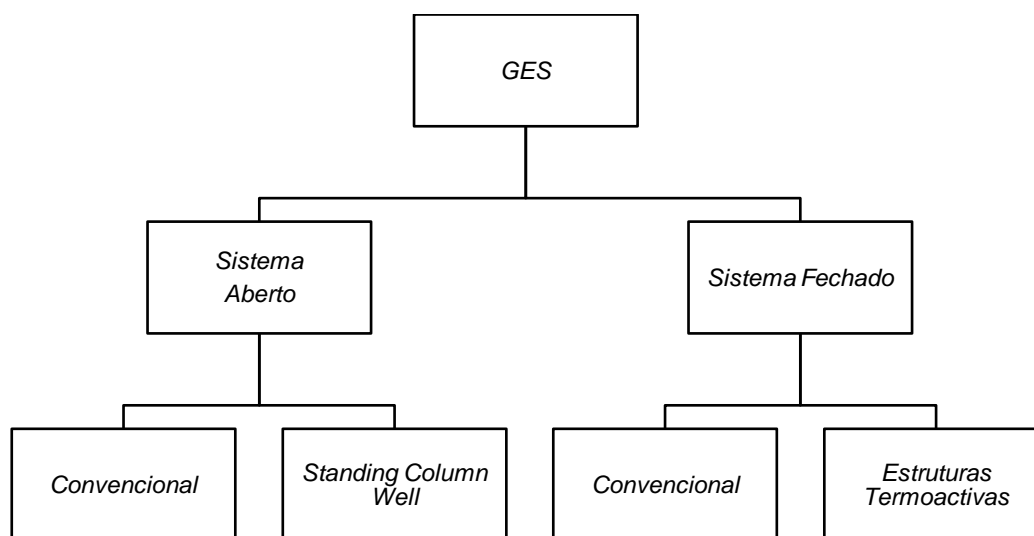


Figura 2.2 Classificação genérica para os sistemas geotérmicos de baixa entalpia

Nos GES, o solo ou a água subterrânea são a fonte natural de calor, tomando-se assim partido do seu potencial térmico e capacidade natural para armazenar energia térmica. As zonas mais superficiais da crosta sofrem oscilações de temperatura em virtude das variações de radiação térmica provenientes do Sol (zona heterotérmica)<sup>3</sup>, no entanto a partir de certas profundidades, da ordem dos 10m, as variações sazonais de temperatura à superfície deixam de ter efeito na temperatura em

<sup>3</sup> Zona heterotérmica-região superficial da crosta terrestre onde a temperatura é variável devido às oscilações de temperatura à superfície.

profundidade que permanece aproximadamente constante (Bourne-Webb e Bodas-Freitas, 2009; Johnston et al., 2011) (zona homotérmica)<sup>4</sup>. Esta temperatura aproximadamente constante próxima da superfície tenderá em cada local para a temperatura média anual, sendo que as oscilações diárias apenas se fazem sentir a menos de 1m da superfície (Vieira e Maranhã, 2009). A variação de temperatura para profundidades superiores é, segundo Banks (2008 citado em Johnston et al., (2011)), na generalidade dos casos cerca de 1°C por cada 35m

Os sistemas GES podem variar consoante as temperaturas de exploração, ou seja, em função das necessidades energéticas das estruturas e infra-estruturas a climatizar. Nos casos em que as temperaturas de operação são adequadas para aquecimento directo, o calor é introduzido directamente no sistema de climatização. Quando as temperaturas de operação são mais reduzidas, é necessário utilizar bombas de calor (GSHP) por forma a obter temperaturas de operação adequadas à climatização. Existem dois tipos de GSHP: as bombas cuja fonte é a água subterrânea, *Ground Water Heat Pumps* (GWHP) e as bombas que utilizam os solos ou rochas como fonte de energia térmica, *Ground Couple Heat Pumps* (GCHP).

Os sistemas GSHP são constituídos por um circuito primário, um circuito secundário e uma bomba de calor que os liga. O circuito primário constitui o componente do sistema que está em contacto com o solo. Inclui um conjunto de tubagens, em circuito fechado ou aberto, colocadas no subsolo. Ao conjunto do sistema através do qual é captada a energia térmica em profundidade, é geralmente dado o nome de *Ground Heat Exchanger* (GHE) (permutador de calor). O GHE engloba as tubagens, no interior das quais circula o fluido de transporte de energia, bem como o material que preenche o espaço anelar do furo. As tubagens são geralmente fabricadas em polietileno com diâmetro externo entre 25mm e 54mm. Todavia, em casos onde se verifiquem temperaturas mais elevadas, entre 30°C e 40°C, é mais adequada a utilização de tubagens de polibutileno, em virtude deste material apresentar melhor comportamento que o anterior, na gama de temperatura referida. Os GHE são parte integrante tanto de sistemas fechados como abertos.

A bomba de calor integra um evaporador, um compressor e um condensador. No interior do edifício existe o circuito secundário, através do qual o calor é adicionado ou retirado. Este último é geralmente composto por pisos ou tectos radiantes, radiadores ou ventilo-convectores (*fan coils*).

Um outro conceito associado à energia geotérmica de baixa entalpia consiste na utilização dos solos, rochas e cavidades subterrâneas para o armazenamento de energia térmica. Este tipo de sistemas, designados como *Underground Thermal Energy Storage Systems* (UTES), tiveram os seus primeiros desenvolvimentos nos anos 70 do século XX. O seu objectivo principal é conservação da energia térmica proveniente de diversas fontes, possibilitando assim uma maior eficiência do GES (Lee, 2013). Através de sistemas UTES é possível acumular energia térmica no solo proveniente do calor natural, existente no ar ou em massas de água superficiais, de processos mecânicos utilizados na indústria onde existe geração de calor ou de sistemas combinados onde ao GES é adaptado um

---

<sup>4</sup> Zona homotérmica-região da crosta onde as variações de temperatura se devem apenas ao gradiente geotérmico.

sistema de energia solar (sistema solar-térmico). Segundo o mesmo autor, o calor armazenado no Verão pode ser utilizado no Inverno para aquecimento. De forma análoga, no Verão, o solo apresentará temperaturas mais reduzidas devido à extracção de calor realizada no Inverno, tal facto resultará num aumento do gradiente térmico entre os permutadores de calor e o solo na estação quente, o que resultará numa maior quantidade de energia dissipada.

Os sistemas abertos podem incorporar um sistema UTES do tipo *Aquífer Thermal Energy Storage Systems* (ATES), os fechados, quando utilizados como reservatórios, incluem sistemas do tipo *Borehole Thermal Energy Storage Systems*, cujo acrónimo é BTES. Além destes, existem ainda sistemas do tipo *Cavern Thermal Energy Storage Systems* (CTES), onde as cavidades subterrâneas naturais, ou não, são utilizadas como reservatório.

### **2.3.1. Sistemas abertos**

Os sistemas abertos, foram aplicados inicialmente em grandes instalações comerciais no final da década de 40 do século XX, passando nos anos 60 a ser utilizados de forma mais ampla em edifícios residenciais (Rafferty, 2003).

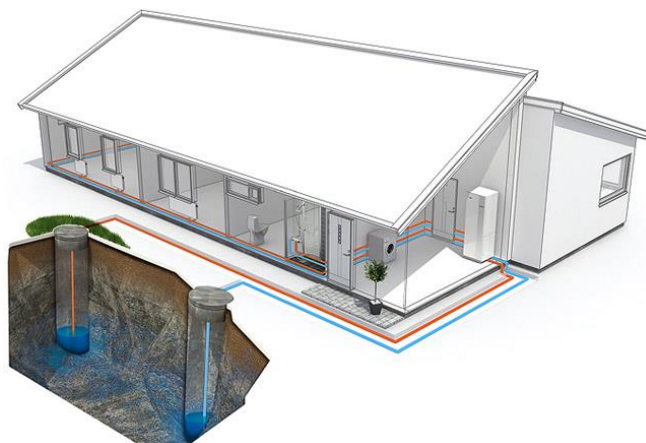
Segundo a RHC (2012) estes sistemas são aplicados em zonas da superfície e sub-superfície da crosta onde os solos são constituídos por fracções grosseiras, típicas de ambientes sedimentares glacial, fluvial ou marinho. Como referido por Omer (2008) os sistemas abertos constituem soluções de climatização de grandes estruturas. Segundo outros autores como Rafferty (2003), podem também ser utilizados em edifícios residenciais, especialmente de pequenas dimensões.

Estes sistemas podem ser diferenciados em dois grupos básicos, os sistemas convencionais abertos ou *convencional open loop systems* (COL) e os sistemas abertos sem variação de água no furo, ou *standing column* (SC) (Rafferty, 2003). Por outro lado, Self *et al.* (2013) distingue três tipos de sistemas abertos, um onde são utilizados apenas poços de captação, outro onde são utilizados poços de injeção e captação e um último onde são incluídos os sistemas que utilizam as massas de água superficiais. Tal como este autor, também Deng *et al.* (2005) e Omer (2008) não incluem os SC no grupo dos sistemas abertos, designando-os como mistos.

Os sistemas abertos que recorrem apenas a poços de captação, utilizam a água subterrânea não procedendo à sua posterior devolução ao aquífero. Nestes casos, as águas captadas são descarregadas à superfície, podendo, segundo Omer (2008) ser utilizadas por exemplo para irrigação.

Nos sistemas que permitem a reinjecção no aquífero, existe a necessidade de construção de pelo menos dois furos. Um utilizado para a captação e outro para a injeção (Figura 2.3). O funcionamento é simples, a água subterrânea é captada no furo de captação e conduzida através do sistema, que pode ou não incluir uma GWHP. Após as trocas energéticas por meio do circuito secundário, as águas são novamente reinjectadas no aquífero através do furo de injeção. Este é normalmente

localizado a alguma distância do furo de captação, sendo assim garantida uma adequada temperatura de operação.



**Figura 2.3 Sistema aberto captação-reinjeção com bomba de calor** (Nibe Energy Systems, 2009)

Os sistemas do tipo SC apresentam um funcionamento distinto dos anteriores. Nestes, a água é captada no furo e enviada para o sistema de climatização da estrutura/infra-estrutura. Após as trocas de energia, parte da água, cerca de 10 %, é descarregada à superfície, o restante volume é então reinjectado na parte mais superficial do furo de captação. Desta forma é possível manter o nível de água no poço constante, permitindo o afluxo de água ao furo no seu trecho inferior sem que exista influência da temperatura da água reinjectada.

Um caso particular dos sistemas com reinjecção são aqueles que incluem ATES, permitindo o armazenamento das águas captadas frias ou quentes. Lee (2013) define três tipos de concepções distintas: sistemas para armazenamento de “frio”, sistema para armazenamento de calor e sistemas cíclicos para armazenamento de frio e calor. Segundo o mesmo autor, no caso dos dois primeiros sistemas é possível conservar energia térmica durante alguns meses. Todavia, no segundo caso, as perdas podem ser mais significativas em virtude dos processos convectivos que possam existir. Por fim, o último tipo de sistema de armazenamento apresenta melhorias significativas na eficiência comparativamente aos dois primeiros. São geralmente utilizados com recurso a bombas de calor.

A implementação de qualquer uma das concepções mencionadas requerer um adequado conhecimento das condições hidrogeológicas da zona de implantação e das propriedades químicas da água. A sua aplicabilidade está circunscrita a zonas onde a quantidade e qualidade das águas subterrâneas, bem como a legislação vigente o permitam. Segundo Omer (2008) os ATES podem ser fortemente rentáveis quando exista a possibilidade de posterior reutilização da água captada. No entanto, este tipo de concepções está fortemente sujeita a problemas associados à qualidade da água, como é o caso da corrosão dos componentes metálicos, da presença de partículas em suspensão ou obstrução das tubagens devido à sua calcinação. Os efeitos mecânicos do rebaixamento à superfície, de que são exemplo os fenómenos de subsidência, devem também ser avaliados.

### 2.3.2. Sistemas fechados

Nos sistemas fechados não existe contacto entre o fluido de transporte de energia térmica e o solo/rocha, não havendo por isso troca de matéria. Os custos de instalação são na generalidade dos casos superiores aos requeridos para implementação de um sistema aberto (Rafferty, 2003). Não obstante isto, exibem maior espectro de aplicabilidade em virtude de não estarem dependentes da quantidade de água subterrânea disponível. Assim, é possível afirmar que em teoria apresentam âmbito de aplicação global.

As trocas de energia térmica podem ser realizadas utilizando dois tipos de sistemas. Um onde são englobados os sistemas convencionais de extracção e outro que utiliza estruturas termoactivas.

#### 2.3.2.1 Sistemas convencionais

Os sistemas convencionais fechados podem apresentar diferentes configurações no que concerne à instalação dos GHE. Estes podem ser inseridos em furos verticais (*Borehole Heat Exchanger – BHE*) ou valas. Os primeiros constituem sistemas de extracção vertical (Figura 2.4 (A)) e os segundos horizontal (Figura 2.4 (B)).

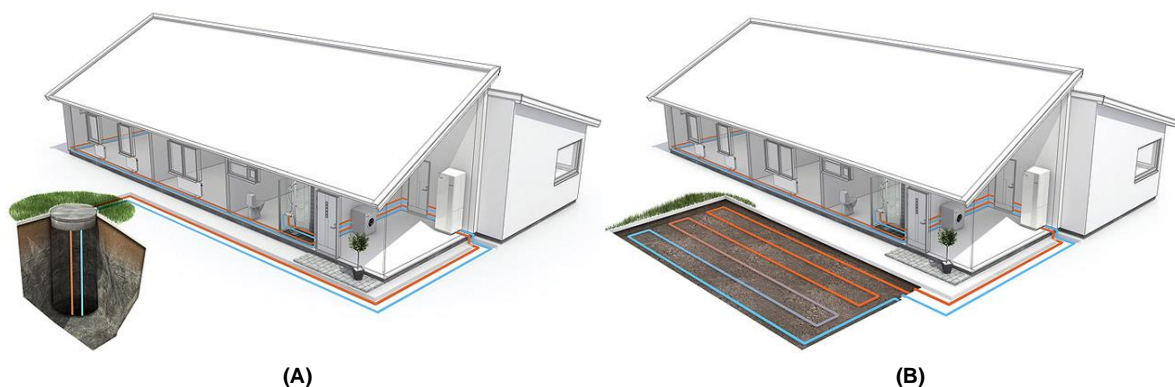


Figura 2.4 Sistemas fechado (A) vertical e (B) horizontal com GCHP (Nibe Energy Systems, 2009)

Os sistemas que utilizam extracção horizontal apresentam maior facilidade de instalação que os verticais, necessitando na generalidade dos casos de maiores áreas para a sua implementação (Self *et al.*, 2013). A instalação das tubagens é realizada segundo três configurações distintas: configuração simples, em paralelo e em série. A configuração simples implica grandes áreas de implementação. São geralmente compostas por um único tubo onde circula o fluido de transporte, apresentando em planta forma quadrangular ou rectangular. O recurso a tubos permutadores horizontais dispostos em série, como se ilustra na

Figura 2.4 direita, resulta na diminuição da área necessária para a instalação. Omer (2008) considera ainda que implementação de configurações em série ou paralelo permite uma maior flexibilidade e rentabilidade do sistema. O autor refere ainda a utilização de sistemas horizontais com GHE dispostos em espiral, também designados por *slinky*. Neste caso, os tubos permutadores de calor são colocados nas valas tal como se ilustra na Figura 2.5. Estes sistemas de captação/injecção requerem



menores áreas, podendo em alguns casos apresentar menores custos de instalação. Contudo, são necessários tubos permutadores mais extensos e maiores quantidades de energia para bombagem.



Figura 2.5 Permutadores em *slinky* (fonte: <http://www.intermountainheating.com/geothermal.php>)

A construção dos GHE horizontais é simples, devendo ser levado em conta o espaçamento a aplicar entre cada uma das tubagens, bem como o regime térmico dos solos. As valas onde são introduzidos os tubos permutadores, devem ser preenchidas com o material resultante da escavação das mesmas. Durante o preenchimento, os tubos devem ser mantidos sob pressão e garantir que nenhum dos trechos é danificado. Sendo este um tipo de aproveitamento onde a captação da energia térmica é realizada em zonas muito superficiais, torna-se essencial ter em atenção as variações sazonais de temperatura à superfície. Omer (2008) refere que os aproveitamentos com extracção horizontal são não só influenciados pelas variações sazonais de temperatura, mas também pela pluviosidade ao longo do ano. As oscilações nas condições climatológicas à superfície podem resultar em alterações das propriedades geotécnicas e térmicas dos solos, que se repercutem na eficiência de todo o aproveitamento geotérmico superficial.

Os sistemas fechados com extracção vertical utilizam furos no interior dos quais são introduzidas as tubagens onde circula o fluido de transporte. Por forma a garantir bom contacto entre o meio envolvente e a tubagem, o espaço anelar do BHE deve ser preenchido com materiais com boa capacidade para a condução de calor. Desta forma, é possível diminuir a resistência térmica do furo levando a um ganho de eficiência. Para além da diminuição da resistência térmica do furo, o preenchimento permite a diminuição substancial do fluxo vertical de água e funciona também como protecção para os tubos permutadores de calor. Segundo McCorry e Jones (2011), são exemplos de materiais adequados para preenchimento a areia (com diferentes teores em água), a bentonite, misturas de cimento com areia e/ou bentonite entre outros. Também neste caso, durante o processo de enchimento dos furos, as tubagens devem ser mantidas sob pressão.

As tubagens, tal como acontece nos sistemas horizontais, podem ser dispostas no interior dos BHE de diferentes formas. Gehlin (2002) considera duas configurações básicas (Figura 2.6): *U-pipe* e *Coaxial*, estes últimos também designados por *tube-in-tube*. Além destas, existem ainda

configurações mais complexas que utilizam múltiplos *U-pipes* (*double* e *triple U-pipes*), *W-pipes* e tubos permutadores de calor dispostos em hélice.

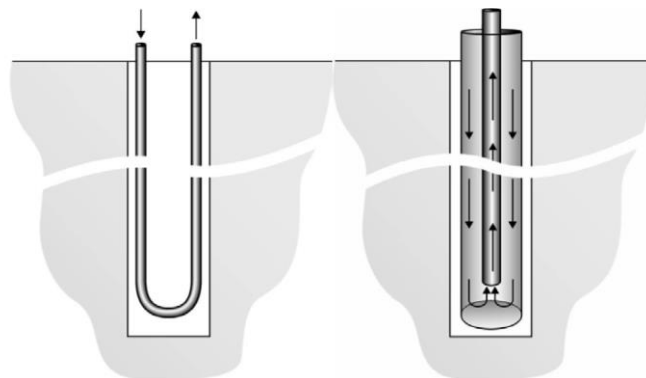


Figura 2.6 Configurações fundamentais para os BHE: *U-pipe* (esquerda) *Coaxial* (direita) (Gehlin, 2002)

A Figura 2.6 (esquerda) representa um *U-pipe* constituído por dois tubos rectos conectados por um dispositivo como o apresentado na Figura 2.7. Num dos trechos dá-se o movimento descendente do fluido de transporte e no outro o movimento ascendente, existindo em ambos permuta de energia térmica.



Figura 2.7 Peça utilizada para união do trecho descendente e ascendente de um tubo permutador do tipo *U-pipe* (fonte: <http://www.holymoor.co.uk/Intcoursecontent.htm>)

Segundo Gehlin (2002) e Omer (2008) no interior de cada BHE podem ser dispostos mais do que um destes tubos. A utilização de sistemas com múltiplos *U-pipes* tem vindo a ganhar expressão, existindo actualmente diversos aproveitamentos nos quais se recorreu a *double U-pipes* e *triple U-pipes*. Para o primeiro autor estas tecnologias têm vindo a ganhar espaço, pois constituem soluções eficazes para profundidades de exploração maiores. Nestes casos a utilização de múltiplos *U-pipes* permite uma diminuição da resistência térmica do furo e perdas de energia mais reduzidas, comparativamente à utilização de apenas um *U-pipe*. Existem também configurações que utilizam tubos permutadores de calor em forma de W, designando-se por isso como *W-pipes*. Os tubos permutadores de calor coaxiais, como se ilustra na Figura 2.6 (direita), são compostos por duas tubagens de diferente diâmetro. A tubagem de menor secção é colocada no interior do tubo de maior secção. O espaço vago entre o conjunto e a parede do furo é preenchido, à semelhança das configurações anteriores, com materiais que garantam a boa transferência de calor entre o solo e o fluido de transporte. Existem no entanto, segundo Beier *et al.* (2013), casos em que é utilizada esta tecnologia sem que seja preenchido o espaço vazio entre o tubo permutador exterior e a paredes do BHE. Estudos desenvolvidos por Hellström em 1998 e 2001, citados em Beier *et al.* (2013), consideram que a tecnologia coaxial permite importantes melhorias no que se refere à diminuição da resistência térmica



do furo. Tal facto traduz-se num aumento da capacidade de transferência de energia entre os solo e o fluido de transporte e vice-versa.

O espaçamento, profundidade e diâmetro dos BHE são variáveis e dependentes das condições locais de implementação. Todavia, Omer (2008) sugere que, em regra, a distância entre cada um dos furos não deve ser inferior a 4,6m no Norte da Europa e 6,1m no Sul. A razão para estes valores de espaçamento entre cada BHE não é explicitada pelo autor.

O funcionamento do solo como reservatório de energia é também possível nos sistemas fechados, não existindo porém injeção ou extracção de água subterrânea. Segundo Lee (2013) nos sistemas BTES o calor ao ser extraído durante a estação fria provoca uma diminuição da temperatura do solo. Na estação quente, o solo funcionará como reservatório de “frio”, o calor captado pelo sistema secundário é levado até ao subsolo pelo sistema primário onde é dissipado. A temperatura do reservatório sofrerá um aumento gradual, estando novamente apto no Inverno para fornecer calor. O processo repete-se de forma cíclica, permitindo assim a climatização.

### 2.3.2.2 Estruturas termoactivas

Os sistemas de climatização para aquecimento e arrefecimento por estruturas termoactivas, também designados por geoestruturas termoactivas, tomam partido da capacidade do terreno como um sistema de armazenamento e deposição de energia térmica. O factor chave da sua sustentabilidade é o uso de elementos do edifício, que são já necessários por motivos estruturais, para a extracção e injeção de energia térmica no solo (Brandl, 2006; Vieira e Maranhã, 2009). Suryatriyastuti *et al.* (2012) designaram-nas devido ao seu duplo fim como estruturas bi-funcionais.

Podem integrar tanto sistemas fechados horizontais como verticais. Assumem uma configuração horizontal quando colocados em lajes de fundo (Figura 2.8 direita), ou por outro lado, vertical, se forem dispostas ao longo das estacas de fundação (Figura 2.9) ou de paredes moldadas (Figura 2.8 esquerda).

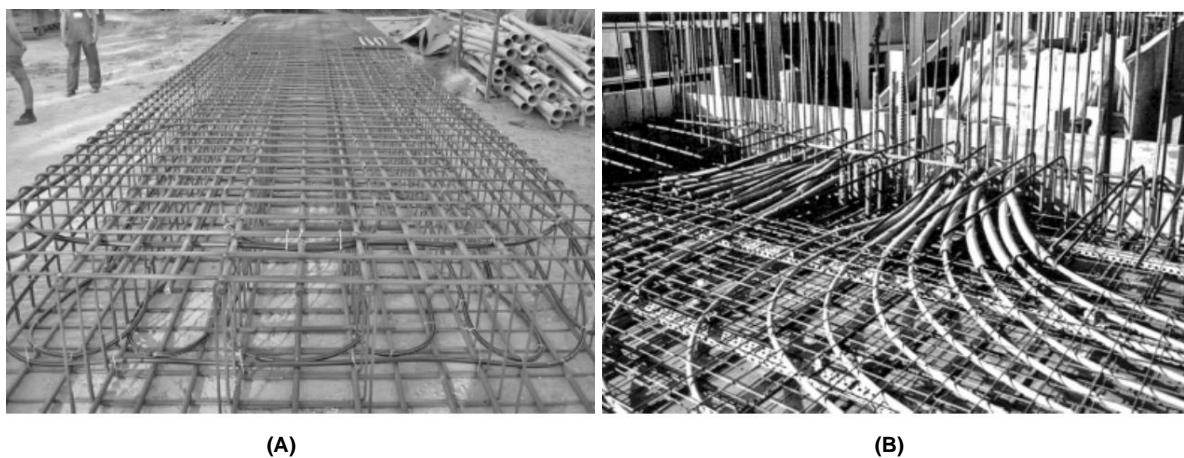


Figura 2.8 (A) Tubos permutadores de calor solidarizados à armadura de uma parede moldada e (B) zona de entrada dos permutadores de calor numa laje de fundo (Brandl, 2006)

No caso de estruturas de betão armado, os permutadores de calor são introduzidos no interior do betão, solidarizados com as armaduras. A estrutura termoactiva inclui geralmente tubos permutadores do tipo *U-pipe* ou *W-pipe*, que podem ser utilizados com configurações múltiplas. Ao serem inseridos no interior das estruturas termoactivas, os tubos são naturalmente envolvidos pelo betão que ao funcionar como material de preenchimento, desempenha um papel fundamental na eficiência da fundação enquanto meio de captação e injeção de calor. Para além das estruturas de fundação em betão armado, Laloui e Di Donna (2013) referem a utilização de estacas metálicas para a captação e injeção de energia térmica no solo. Estas devido à sua elevada condutividade térmica diminuem a resistência térmica do conjunto estaca-tubo permutador. Por apresentarem secções ocas, é comum a utilização de preenchimentos como água, betão ou areia (Brandl, 2006; Laloui e Di Donna, 2013).

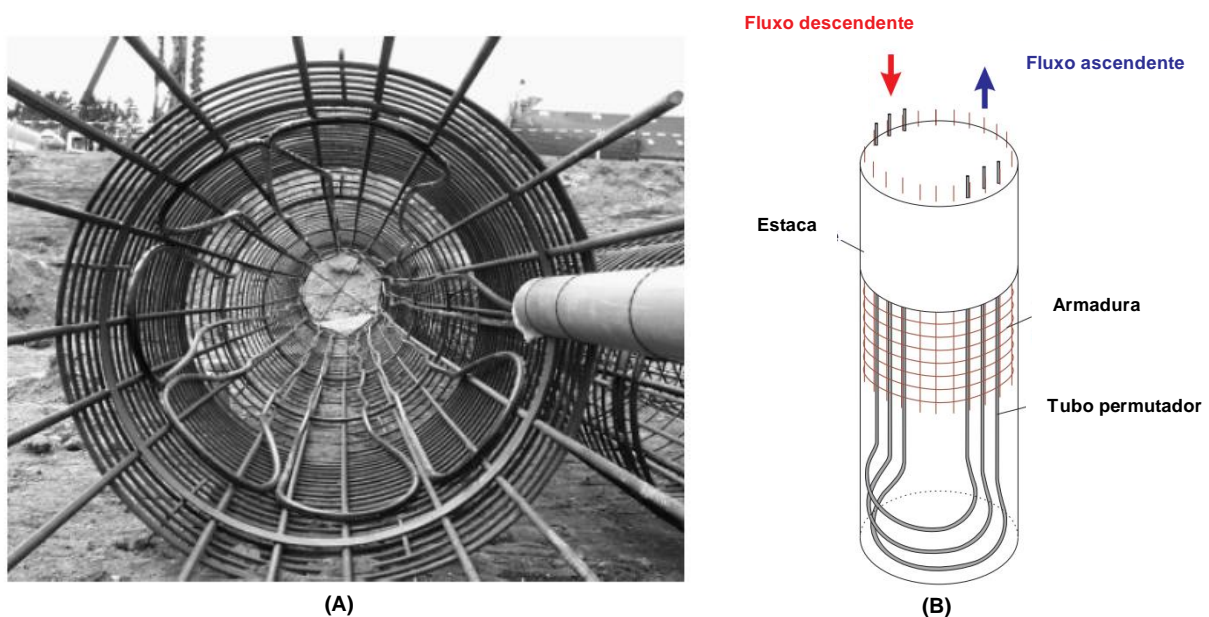


Figura 2.9 (A) Armadura de uma estrutura termoactiva com tubos permutadores de calor (Brandl, 2006), (B) esquema de uma estaca termoactiva com utilização de *triple U-pipes*, adaptado de Sauerwein e Hude (2007)

Mais recentemente o conceito de estrutura termoactiva foi transportado para os túneis, onde os volumes de solo mobilizados para captar e dissipar energia são consideravelmente superiores aos dos restantes casos (Bouazza e Adan, 2012; Markiewicz e Adam, 2009). A instalação dos tubos permutadores é realizada de forma diferente consoante o tipo de método construtivo. No caso de túneis escavados por *cut and cover*, os permutadores são instalados na armadura do betão tal como nas estacas ou paredes moldadas. Noutros, escavados segundo abordagens metodológicas como o NATM, a instalação é mais difícil. No *invert*, os GHE são colocados tal como se apresenta na Figura 2.10 (A), nos hasteais e tecto é aplicada uma tecnologia diferente das anteriores. São utilizados dois geotêxteis entre os quais são dispostos os permutadores de calor. O geocompósito obtido é então instalado entre o revestimento primário e secundário do túnel (Figura 2.10 (B)) (Markiewicz e Adam, 2009).

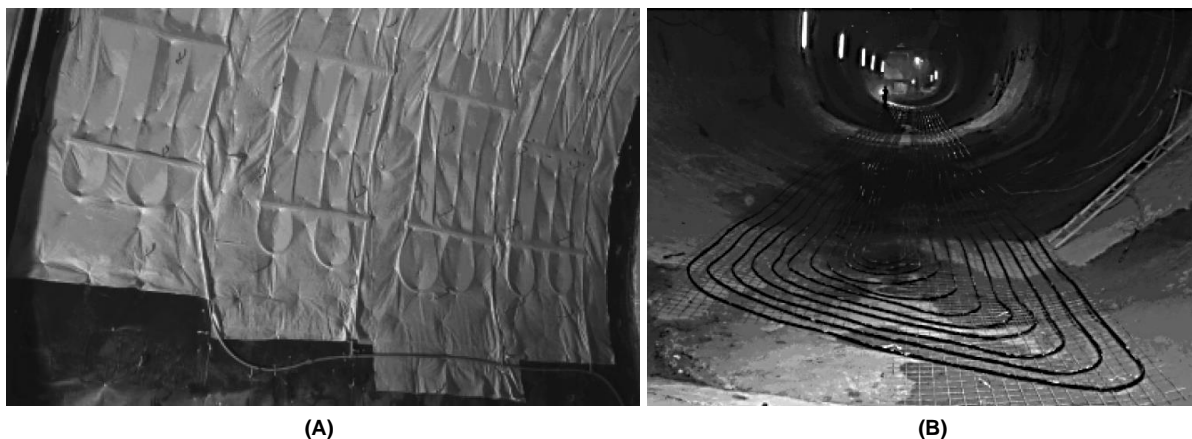


Figura 2.10 (A) Detalhe do geocompósito termoactivo instalado no *Lainzer Tunnel*, trecho LT22 do metro de Viena; (B) Tubos permutadores de calor instalados no *invert* do *Lainzer Tunnel*, estação *Taborstraße* linha U2 (metro de Viena) (Markiewicz e Adam, 2009)

Segundo Brandl (2006) e Suryatriyastuti *et al.* (2012), os sistemas de baixa entalpia que recorrem a estruturas termoactivas são aplicáveis a sistemas reversíveis de aquecimento-arrefecimento ou podem ser sistemas unicamente planeados para aquecimento ou arrefecimento.

A utilização de estruturas termoactivas para captação e injeção de energia térmica, apesar de se revelar bastante vantajosa, deve ser realizada com alguma precaução. Banks (2012) afirma que a utilização de estacas para a introdução ou extracção de energia térmica só é possível se existirem garantias concretas de que não há mudança na sua capacidade de carga. Por vezes, as variações nas propriedades geotécnicas do solo provocadas pelo carregamento térmico podem resultar em variações na capacidade de carga da infra-estrutura. O autor atenta ainda para o facto das estacas flutuantes, cuja capacidade de carga é resultado do atrito lateral mobilizado ou da adesão, serem mais vulneráveis comparativamente às que funcionam por ponta, fundadas no substrato rochoso.

De entre os sistemas geotérmicos superficiais, aqueles que utilizam estruturas de fundação termoactivas tem apresentado grande desenvolvimento em toda a Europa, prevendo-se a sua crescente e generalizada utilização no futuro. Alguns exemplos paradigmáticos onde esta tecnologia é hoje utilizada para climatização, são o terminal E do Aeroporto Internacional de Zurique ou o *Swiss Federal Institute of Technology* em Lausanne.

## 3. Transferência de calor nos solos

### 3.1. Considerações iniciais

O solo é um sistema multifásico constituído por um conjunto de partículas sólidas de diferentes formas e tamanhos cujos vazios são ocupados por ar e água (Figura 3.1). As suas propriedades térmicas são assim dependentes dos diferentes materiais que o constituem, da sua composição e arranjo espacial.

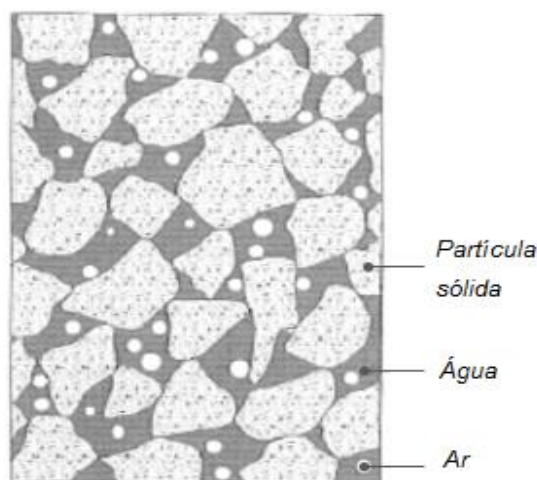


Figura 3.1 Modelo conceptual do solo (Matos Fernandes, 2011)

Ao ser estabelecido um gradiente de temperatura, a transferência de calor no solo ocorrerá, isolada ou conjuntamente por: condução, convecção, radiação, vaporização-condensação, trocas iónicas e congelação-descongelação (Brandl, 2006 e Rees *et al.*, 2004). A actuação destes mecanismos verificar-se-á até que os gradientes térmicos estabelecidos sejam nulos, altura em que o sistema atingirá temperatura constante e igual em qualquer ponto. A eficácia e a forma como as trocas de energia térmica se processam no solo, são não só dependentes das suas propriedades térmicas mas também de outras, geológicas, hidrogeológicas e geotécnicas.

Neste capítulo são abordados os mecanismos de transferência de calor mais comuns nos solos e as propriedades geológicas e hidrogeológicas que influenciam de forma mais significativa o seu comportamento.

### **3.2. Solos: grandezas básicas**

A importância das propriedades geológicas e geotécnicas dos solos na definição do seu comportamento térmico é amplamente difundida em diversos trabalhos de onde se destacam os realizados por Banks (2012); Brandl (2006); Farouki (1981); Hillel (1998) e Laloui e Di Donna (2013). Qualquer uma destas publicações atenta para a importância de propriedades como a massa volúmica  $\rho$ , peso volúmico  $\gamma_h$ , teor em água  $\omega$ , porosidade  $n$ , composição mineralógica e dimensão dos grãos, na definição do seu comportamento térmico. No que se refere à hidrogeologia o principal factor a ter em conta é o fluxo subterrâneo de água. Para diversos autores a sua existência influencia consideravelmente o funcionamento dos GHE e consequentemente todo o GES.

#### **3.2.1. Propriedades índice**

As partículas que constituem o solo resultam da actuação dos processos de geodinâmica externa nas rochas, levando à sua desintegração. A composição mineralógica dos solos é por isso em grande parte, função das rochas que lhe deram origem e em alguns casos, dependente de processos químicos que actuam nos minerais levando à sua alteração para formas mais estáveis.

A sua classificação pode ser realizada em dois grandes grupos tendo por base a sua origem e formação: o primeiro onde se incluem os denominados solos sedimentares e o segundo no qual se inserem os residuais. Os primeiros constituem solos formados por acumulação, num dado local ou depósito, de partículas minerais resultantes da decomposição e da desintegração de rochas existentes noutro local, estando sujeitos a transporte pela água, gelo e vento. Apresentam geralmente maior homogeneidade dentro de cada estrato, pois as condições hidrodinâmicas mantiveram-se sensivelmente uniformes durante os processos de deposição. Os segundos englobam solos que ocupam o lugar da rocha mãe que lhe deu origem, não sofrendo por isso transporte. (Matos Fernandes, 2011).

Os minerais que constituem o esqueleto sólido do solo podem ser de diversos tipos, apresentando naturalmente diferentes propriedades e comportamentos térmicos distintos. O conhecimento das suas fracções fornece, ainda que de forma muito expedita, indicação acerca da capacidade dos solos para transmitir energia térmica e permite em alguns casos a aplicação formulações empíricas para a determinação de propriedades térmicas.

No que concerne aos parâmetros geotécnicos, importa conhecer os índices físicos descritos em geotecnia, sendo de especial relevância a massa volúmica, o índice de vazios e o teor em água natural (Brandl, 2006). Na Tabela 3.1 são apresentadas algumas das grandezas básicas de um solo e as expressões que permitem a sua determinação.

**Tabela 3.1** Definição das grandezas básicas descritivas do estado físico dos solos (Matos Fernandes, 2011)

<b>Grandezas Básicas de Um Solo</b>			
<b>Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Definição</b>	<b>Unidade</b>
Índice de vazios	$e$	$\frac{V_v}{V_s}$	-
Porosidade	$n$	$\frac{V_v}{V}$	-
Grau de saturação	$S_r$	$\frac{V_w}{V_v}$	%
Teor em água	$\omega$	$\frac{W_w}{W_s}$	%
Peso volúmico	$\gamma_h$	$\frac{W_s + W_w}{V}$	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$
Peso volúmico seco	$\gamma_d$	$\frac{W_s}{V}$	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$
Peso volúmico das partículas sólidas	$\gamma_s$	$\frac{W_s}{V_s}$	$\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$
Densidade das partículas sólidas	$G$	$\frac{\gamma_s}{\gamma_w}$	-

onde  $V_v$ ,  $V_w$ ,  $V_s$  e  $V$  são os volumes de vazios, de água, de sólidos e total, respectivamente,  $W_w$  e  $W_s$  são as massas de água e de sólidos,  $\gamma_w$  e  $\gamma_s$  são os pesos volúmcos da água e das partículas sólidas, respectivamente.

O estudo da sensibilidade das propriedades térmicas às variações sazonais de algumas propriedades geotécnicas, como o grau de saturação ou o teor em água, revela-se útil na compreensão do comportamento térmico do solo. Geralmente solos saturados exibem maior capacidade para transmitir e armazenar calor ao contrário do que acontece em solos secos. De igual modo, é possível afirmar que os solos ricos em minerais de argila tendem a apresentar maior resistência à passagem da energia térmica comparativamente a outros ricos em minerais como o quartzo ou a calcite.

A distribuição granulométrica do solo, bem como a forma das partículas sólidas que o constituem definem conjuntamente o tipo de contactos existentes entre partículas. Segundo Farouki (1981) a tipologia dos contactos entre partículas contribui para a maior ou menor capacidade que o solo apresenta para transmitir energia térmica. Em solos granulares secos, como as areias, prevalecem os contactos do tipo sólido-sólido, por outro lado, nos solos finos maioritariamente constituídos por argilas e siltes os contactos deste tipo são muito menos comuns. Geralmente nestes casos, cada grão é envolvido por uma película de água, daí resultando contactos do tipo sólido-líquido-sólido.

Estes observam-se também em areias muito próximas do estado saturado. A existência de água em redor dos grãos melhora de forma significativa a transferência de energia térmica, em virtude da permuta com o ar que apresenta menor capacidade para transmitir energia térmica.

Os processos de secagem e hidratação dos solos resultam também em alterações do comportamento térmico. Naqueles cujo teor em minerais de argila é mais significativo, os processos de secagem e humedecimento provocam fenómenos de expansão e retracção, que em alguns casos dão origem a fendas de tracção. Estas apresentam-se como barreiras à passagem do fluxo térmico contribuindo assim para um aumento na dificuldade do solo em transferir energia térmica. O grau de compactação é também indicador da facilidade do solo para a transmissão de calor. Nos solos arenosos em especial, quanto menor a distância entre o índice de vazios real e o índice de vazios mínimo, determinados em ensaio de compactidade, melhores e maiores serão os contactos sólido-sólido. Tal facto resulta num aumento da quantidade de energia transferida.

### 3.2.2. Propriedades hidrogeológicas

Os solos podem também exibir comportamento térmico variável devido a alterações nos parâmetros hidrogeológicos do meio. Brandl (2006) refere a importância do conhecimento das variações sazonais do nível freático bem como dos parâmetros caracterizadores do fluxo de água subterrâneo. A presença de água no solo não é indiferente no que à transferência de calor se refere. No que respeita aos sistemas geotérmicos de baixa entalpia, Moel *et al.* (2010), consideram que a presença de um fluxo subterrâneo de água complica os processos de transferência de energia térmica entre o solo e os permutadores de calor (Figura 3.2). Tal aumento de complexidade não se reflecte necessariamente de forma negativa.

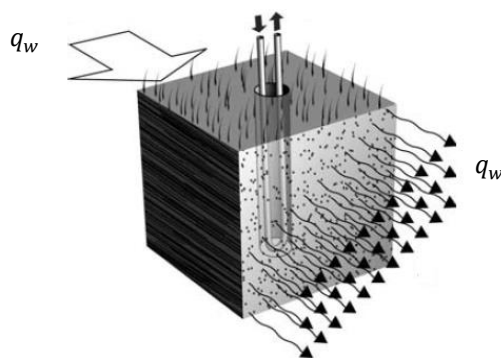


Figura 3.2 Fluxo de água subterrâneo em redor de um BHE (Gehlin, 2002)

Para Rees *et al.* (2000), a existência de um fluxo subterrâneo cuja importância seja considerável, pode promover a dissipação do calor injectado no subsolo. De igual modo, o mesmo fluxo, pode funcionar como meio de transporte de energia térmica para a zona de captação. A eficiência da dissipação ou do afluxo de calor potenciado pelo fluxo de água subterrâneo, é função dos parâmetros geológicos e hidrogeológicos do local. De acordo com Diao *et al.* (2004), a dissipação da energia térmica em aquíferos ocorre de forma conjunta por condução e convecção, sendo típica em areias e cascalhos.

Além da importância da água subterrânea nos mecanismos de transferência de calor, é também necessário considerar e avaliar as mudanças algumas das suas propriedades hidráulicas, físico-químicas e biológicas, motivadas pelas variações de temperatura impostas pelos GES. Para Brandl (2006) estas mudanças devem ser avaliadas especialmente quando a climatização é realizada de forma intensiva.

### 3.3. Mecanismos de transferência de calor

Quando se trata da transferência de energia térmica, ou simplesmente transferência de calor, é importante definir em primeiro lugar algumas variáveis referentes aos mecanismos.

A quantidade total de energia térmica transferida durante a actuação de um determinado processo é representada por  $Q$  e quantificada em Joules (J). O seu valor pode ser determinado por:

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (3.1)$$

onde  $\dot{Q}$  é a quantidade de energia transferida por unidade de tempo, ou taxa de transferência de calor expressa em W, e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo para o qual ocorre a transferência de energia térmica. Caso se verifique que  $\dot{Q}$  se mantém constante durante todo o período de actuação de um dado mecanismo de transferência ( $\Delta t$ ), a equação (3.1) pode ser reescrita como:

$$Q = \dot{Q} \cdot \Delta t \quad (3.2)$$

A taxa de transferência de calor por unidade de área normal à direcção segundo a qual se dá a propagação de energia térmica, representada por  $\dot{q}$  e expressa em unidades SI em  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ , designa-se por fluxo de calor. Este é definido pelo quociente entre a quantidade de calor transferido por unidade de tempo e a área da secção perpendicular à direcção de fluxo  $A$  ( $\text{m}^2$ ) (equação (3.3)).

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (3.3)$$

Cada uma destas variáveis é definida em cada um dos mecanismos de transferência de calor com base em diferentes propriedades térmicas.

#### 3.3.1. Condução

A transferência de calor por condução define-se como processo através do qual num dado meio, o calor é transferido de um ponto para outro sem que exista movimento observável macroscopicamente (Rees *et al.* 2000). Este é um processo de grande importância quando se trata de transferência de calor no sistema Terra, sendo o principal mecanismo actuante na crosta (Lowrie, 2007 e Williams e Smith, 1989).

Nos solos, Brandl (2006) e Rees *et al.* (2000), consideram a condução como o principal mecanismo de transferência. Para o primeiro autor se a dimensão das partículas sólidas e poros do solo apresentarem dimensões desprezáveis relativamente ao volume total em análise, é razoável reduzir o



problema da transferência de calor apenas ao processo de condução. A taxa de fluxo de calor está directamente relacionada com a geometria, espessura, tipo de material e diferença de temperatura imposta (Çengel, 2003).

A condução pode ocorrer segundo dois regimes distintos. Um denominado permanente, no qual não existe variação no tempo do campo de temperaturas, e outro, designado variável, no qual existe variação do campo de temperaturas. Para Çengel (2003), o último constitui o regime mais comum existente na natureza. A análise deste processo de transferência pode ser realizada de forma uni, bi, ou tridimensional. A escolha depende da magnitude relativa da transferência de calor nas diferentes direcções, bem como da precisão a garantir.

Jean Fourier propôs em 1822 a Lei da Condução de Calor, ou de Fourier. De acordo com esta para um fluxo unidireccional de calor, a quantidade de energia térmica transferida por unidade de tempo entre dois pontos distanciados  $\Delta x$ , com  $\Delta x \rightarrow 0$ , é directamente proporcional à diferença de temperatura  $\Delta T$  e área  $A$ , e inversamente proporcional à distância entre os dois pontos. Esta relação pode ser escrita como se apresenta na equação (3.4).

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.4)$$

onde  $\dot{Q}_{cond}$  é a taxa de transferência de calor por condução,  $\lambda$  é a condutividade térmica em  $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  e  $\Delta T$  a diferença de temperatura em K. Na forma diferencial, tal como proposto por Fourier, a equação é escrita como:

$$\dot{Q}_{cond} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.5)$$

onde  $\frac{\partial T}{\partial x}$  é o gradiente térmico.

No caso tridimensional, Çengel (2003) propõe a abordagem que se segue. Considere-se uma superfície isotérmica e um ponto  $P$  que pertence a esta, tal como se ilustra na Figura 3.3.

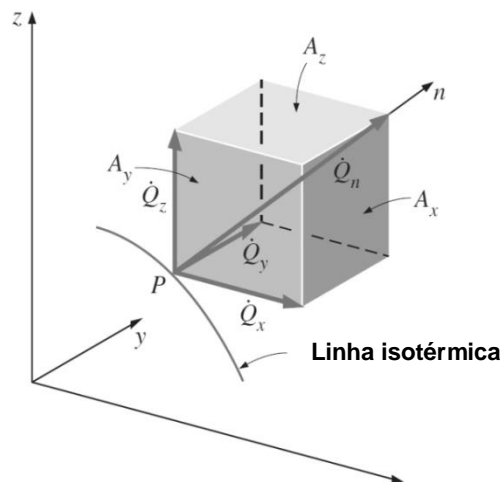


Figura 3.3 Esquema de vector fluxo de calor para o caso tridimensional, adaptado de Çengel (2003)

O vector taxa de transferência de calor no referido ponto será normal à superfície e terá o sentido do decréscimo de temperatura. Se  $\vec{n}$  é o vector normal à superfície isotérmica no ponto  $P$ , então  $\vec{Q}_{n,cond}$  pode ser expressa através da Lei de Fourier, como se apresenta na equação (3.6).

$$\vec{Q}_{n,cond} = -\lambda \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial n} \quad (3.6)$$

onde  $\frac{\partial T}{\partial n}$  é o gradiente de temperatura dado pela equação (3.7).

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (3.7)$$

podendo o vector taxa de transferência de calor ser escrito, em coordenadas rectangulares, como:

$$\vec{Q}_{n,cond} = \dot{Q}_x \vec{i} + \dot{Q}_y \vec{j} + \dot{Q}_z \vec{k} \quad (3.8)$$

A equação geral da condução de calor, conhecida como equação da difusão, é escrita para o caso tridimensional como se apresenta na equação (3.9).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{g} = \rho C \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.9)$$

onde  $\rho$  é a massa volúmica,  $C$  é a capacidade térmica e  $\dot{g}$  a energia térmica gerada no interior do sistema por unidade de tempo. Importa ainda referir que o termo  $\rho C \frac{\partial T}{\partial t}$  corresponde à taxa de aumento de energia interna do sistema por unidade de volume e  $\nabla^2 \lambda T$  é a taxa de condução de calor por unidade de volume.

### 3.3.1.1 Regime permanente

O regime permanente de transferência de calor é estabelecido quando para um qualquer ponto no interior de um corpo não existe variação de temperatura no tempo. Desta forma, o campo de temperaturas estabelecido é constante verificando-se para qualquer ponto a condição explicitada na equação (3.10).

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad (3.10)$$

Çengel (2003) refere, recorrendo ao conceito de energia interna de um sistema, que neste regime a taxa de entrada de energia térmica por unidade de tempo,  $\dot{Q}_{entrada}$ , é exactamente igual à quantidade de calor que sai, por unidade de tempo,  $\dot{Q}_{saída}$ . Assim, se for realizado o balanço de energia tal como se indica na equação (3.11), verificar-se-á que a variação da energia interna do sistema será zero.

$$\dot{Q}_{entrada} - \dot{Q}_{saída} = \frac{dE_{sistema}}{dt} = 0 \quad (3.11)$$

Onde  $\frac{dE_{sistema}}{dt}$  é a variação de energia interna do sistema ao longo do tempo.

A equação geral da difusão de calor é reescrita, para o caso permanente e com condutividade térmica constante, como se apresenta nas equações (3.12) e (3.13).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{\dot{g}}{\lambda} = 0 \quad (3.12)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (3.13)$$

A primeira, também conhecida como equação de Poisson, considera uma fonte interna de energia. A segunda, designada por equação de Laplace, não tem em conta nenhuma fonte de energia interna.

### 3.3.1.2 Regime variável ou transitório

A transferência de energia térmica por condução em regime variável implica a variação do campo de temperaturas com o tempo. Assim, ao contrário do que acontece em regime permanente, a temperatura num dado ponto do corpo em análise não se mantém constante no tempo. (equação (3.14)).

$$\frac{dT}{dt} \neq 0 \quad (3.14)$$

A energia interna é também oscilante nestas condições, pois a taxa de entrada e saída de energia térmica por unidade de tempo varia. Neste caso, a equação da difusão é escrita na sua forma geral considerando a energia armazenada através da parcela  $\rho C \frac{\partial T}{\partial t}$ , uma fonte de energia interna  $\dot{g}$  e condutividade térmica constante (equação (3.15)).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{g} = \frac{\rho C}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.15)$$

O regime variável é frequentemente designado por regime transitório. Tal facto é consequência de em diversos processos termodinâmicos de transferência de calor o regime permanente de condução ser precedido de um regime variável.

### 3.3.2. Convecção

A convecção é um processo no qual a energia térmica é transferida por meio da circulação de um fluido (líquido ou gás) (Rees *et al.*, 2000). O fluxo é consequência da diferença de temperatura de um determinado volume em relação a outro. Um fluido ao entrar em contacto com um corpo a temperatura superior à sua aumenta de temperatura. Esta variação positiva tende, regra geral, a provocar a expansão do líquido e a consequente diminuição da sua densidade. Com a diminuição da densidade o fluido terá tendência a ascender. Por outro lado, o mais denso e frio irá migrar, passando a ocupar o lugar do fluido aquecido, menos denso, sendo assim gerado um fluxo (corrente de convecção).

Brandl, (2006) e Rees *et al.*, (2000) consideram a fase sólida dos solos como estática, o que invalida naqueles materiais trocas de energia por convecção. Os autores referem contudo a necessidade de ter em conta este processo de transferência de energia nas fases líquida e gasosa.

O fluxo térmico,  $\dot{q}_{conv\ l}$ , que é gerado por convecção na fase líquida de um solo pode ser determinado pela equação (3.16).

$$\dot{q}_{conv\ l} = c_w \cdot \rho_w \cdot \vec{v}_w \cdot (T - T_0) \quad (3.16)$$

em que  $c_w$  é o calor específico da água existente nos poros,  $\rho_w$  é a massa volúmica da água,  $\vec{v}_w$  é o vector velocidade do fluxos de água e  $T_0$  é a temperatura de referência.

A transferência de energia em gases através de processos de convecção existe apenas na zona não saturada. Na equação (3.17) é apresentada a expressão para a determinação do fluxo de calor por convecção na fase gasosa do solo.

$$\dot{q}_{conv\ g} = c_g \cdot \rho_g \cdot \vec{v}_g \cdot (T - T_0) \quad (3.17)$$

onde  $c_g$ , é o calor específico do ar existente nos poros,  $\rho_g$  é a massa volúmica do ar e  $\vec{v}_g$  é o vector velocidade do fluxo de ar.

### 3.3.3. Radiação

A radiação é o processo através do qual existe transferência de calor através de ondas electromagnéticas. Este tipo de ondas são geralmente denominadas de radiação térmica, distinguindo-as assim dos restantes tipos de ondas electromagnéticas (Halliday *et al.*, 2012). A transferência de energia por radiação electromagnética é comum a todos os objectos e estados físicos da matéria, podendo mesmo ocorrer no vácuo. Segundo Lienhard IV e Lienhard V (2008) e Rees *et al.* (2000), a intensidade do fluxo de energia emitida está fortemente relacionada em primeiro lugar com a temperatura do corpo, e depois com a natureza da sua superfície.

Tal como referido por Lienhard IV e Lienhard V (2008), a maioria dos corpos a baixas temperaturas, onde se incluem a generalidade dos solos na zona superficial da crosta terrestre, apresentam baixas emissões de energia por radiação térmica em detrimento do valor de transferência de energia por convecção e condução. Todavia, Rees *et al.* (2000) afirmam que a radiação pode desempenhar um papel importante na transferência de calor em materiais granulares secos, resultantes da fragmentação das rochas. Wakao e Kato (1969, citado em Rees *et al.* (2000)) afirmam que, por exemplo, para fragmentos de rocha com um diâmetro de 20mm, a contribuição da radiação para a transferência total de calor pode atingir cerca 10%, à temperatura ambiente.

Tal como os mecanismos anteriores, também a radiação pode ser escrita segundo equações matemáticas. O fluxo de calor emitido por um corpo é então dado por (Halliday *et al.*, 2012):

$$\dot{q}_{rad} = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (3.18)$$

em que  $\dot{q}_{rad}$  é o fluxo de térmico por radiação,  $\sigma$  é a constante de Stefan-Boltzman e  $\varepsilon$  é a emissividade.

### 3.3.4. Outros mecanismos de transferência de calor nos solos

Além dos mecanismos referidos anteriormente, autores como Brandl (2006) e Rees *et al.* (2000) referem a existência de transferência de calor associada às mudanças de fase da fracção líquida. Para Tidall *et al.* (1999) estes processos implicam necessariamente a absorção ou o fornecimento de energia térmica ao meio envolvente. Quando a energia térmica é transferida à fracção líquida do solo esta pode não aumentar de temperatura, sendo a energia absorvida ou libertada em consequência do processo de mudança de fase. A quantidade de energia necessária para que ocorra essa mudança é designada como calor de transformação. A transferência de calor por mudança de fase ocorre nos solos durante os processos de congelamento e descongelamento e de vaporização condensação (Brandl, 2006).

Para que aconteça a vaporização da fracção líquida é necessário fornecer energia térmica à água intersticial. A quantidade total de calor necessário para que ocorra vaporização de uma dada massa de água ( $Q_v$ ) pode ser determinada por:

$$Q_v = L_v \cdot m \quad (3.19)$$

em que  $m$  (kg) é a massa de água e  $L_v$  (kJ·kg<sup>-1</sup>) é o calor latente de vaporização.

A pressão de vapor aumentará localmente devido ao processo de vaporização. A tendência natural será para que o vapor se movimente pela zona não saturada por forma a alcançar o equilíbrio de pressões. Durante este processo o vapor arrefecerá, condensando, ocorrendo libertação de energia. A quantidade de energia libertada durante o processo de condensação é dada também pela equação (3.19).

No decorrer do processo de fusão e solidificação da água existe também transferência de energia térmica. A fusão implica absorção de energia e a solidificação libertação. Em qualquer um destes dois casos existem grandes quantidades de energia transferida, porém no caso de aproveitamentos geotérmicos com estruturas termoactiva há que evitá-los (Brandl, 2006).

A quantidade de energia  $Q_v$  a fornecer à fracção líquida quando congelada para que esta funda é dada por:

$$Q_s = L_s \cdot m \quad (3.20)$$

em que  $L_s$  (kJ·kg<sup>-1</sup>) é o calor de fusão.

Por fim, Brandl (2006) considera ainda a existência de transferência de calor associada a trocas iónicas. Farouki (1981) refere a existência deste processo em solos sujeitos a temperaturas muito baixas, resultado da fusão e solidificação da água intersticial durante os períodos de Verão e Inverno.

## 4. Propriedades térmicas do solo (condução)

### 4.1. Considerações iniciais

Para o adequado dimensionamento de um sistema de energia geotérmica de baixa entalpia é necessário o conhecimento dos parâmetros térmicos do solo, bem como dos materiais que o constituem.

O solo é um sistema multifásico constituído por um conjunto de partículas sólidas de diferentes formas e tamanhos cujos vazios são ocupados por ar e água. As suas propriedades térmicas são assim dependentes da água e do ar, e das diferentes partículas que constituem a fase sólida, sua composição químico-mineralógica e arranjo espacial. As referidas propriedades não se mantêm constante ao longo do tempo, variando em função de factores intrínsecos aos constituintes de cada fase e a outros externos. São disso exemplo as variações na composição mineralógica ao longo do tempo devido ao carácter evolutivo dos constituintes da fracção sólida e as variações cíclicas do grau de saturação devido às oscilações da temperatura e pluviosidade ao longo do ano.

Sendo a condução o processo determinante na transferência de calor nos solos, este capítulo incidirá nas propriedades que a permitem avaliar, são elas: a condutividade térmica ( $\lambda$ ), o calor específico ( $c$ ), capacidade térmica ( $C$ ) e difusividade térmica ( $\alpha$ ) (Brandl, 2006).

### 4.2. Condutividade térmica

Tal como referido por Mattsson *et al.* (2008) e Nusier e Abu-Hamdeh (2003), a condutividade térmica dos solos é de relevância significativa no que se refere ao dimensionamento sistemas de energia geotérmica de baixa entalpia. Para o primeiro autor, a condutividade térmica do solo constitui mesmo o parâmetro mais importante para o dimensionamento de sistemas com *GCHP*.

A condutividade térmica,  $\lambda$ , expressa em unidades SI em  $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , é definida como a quantidade de energia que atravessa, por unidade de tempo, uma secção unitária de solo sob um gradiente de

temperatura unitário aplicado na direcção do fluxo de calor. Pode ser definida através da Lei de Fourier, já apresentada nas equações (3.4) e (3.5).

É uma medida da capacidade de um determinado material para transmitir calor, apresentando dependência de diversos factores. Autores como Brandl (2006) e Nusier e Abu-Hamdeh (2003) afirmam existir uma relação directa entre o teor em água ( $\omega$ ), massa volúmica ( $\rho$ ), textura e composição mineralógica e o valor da propriedade. É ainda espectável uma variação da condutividade térmica com a variação da composição química e estado físico da água intersticial. Nusier e Abu-Hamdeh (2003) propõem a divisão daqueles factores em dois grandes grupos, aqueles que são inerentes ao material, como sejam a composição mineralógica ou a textura, e aqueles que podem, até determinado ponto, ser alterados, como o teor em água ou a massa volúmica.

A composição mineralógica assume especial relevância, condicionando o valor de condutividade térmica. Na generalidade dos casos os minerais constituintes do solo, apresentam condutividades próximas. No entanto, existem excepções como o quartzo, que comparativamente a outras mineralogias tem condutividade muito superior. Desta forma é possível afirmar que a presença de uma elevada percentagem daquele mineral no solo resulta numa condutividade térmica mais elevada. Tal realidade é facilmente compreensível pelo contraste entre as condutividades térmicas do quartzo e dos restantes minerais patente na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 Condutividades térmicas de diferentes minerais, água e ar**

<b>Substância</b>	<b>Condutividade térmica (<math>W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}</math>)</b>
Quartzo	7,7 – 7,8*
Feldspatos potássicos	2,3 – 2,5*
Plagioclase	1,5 – 2,3*
Calcite	3,4 – 3,6*
Micas	2,0 – 2,3*
Água	0,613**
Gelo	1,7 – 2,0*
Ar	0,026**

\*Segundo Banks (2012)

\*\*Segundo Çengel (2003)

A variação do grau de compactação do solo, provoca oscilações na sua condutividade térmica, devido à alteração do volume de vazios e contactos sólido-sólido. Ao ser reduzido o índice de vazios, o volume de vazios total do solo diminui, passando o calor a ser transferido em grande parte pela fracção sólida. Segundo Farouki (1981), o aumento na quantidade de partículas sólidas por unidade

de volume, provoca maiores variações na condutividade do solo quando seco. Este facto explica-se pela diferença significativa entre a condutividade térmica do ar e dos diferentes minerais constituintes do solo. Abu-hamdeh e Reeder (2000) referem ainda que, para o mesmo teor em água, a condutividade térmica dos materiais argilosos não apresenta um comportamento regular com o aumento do grau de compactação, tendendo a aumentar mais rapidamente para valores mais baixos de massa volúmica. Para valores superiores, a influência da compactação do solo na definição da condutividade é menos importante. Tal facto não ocorre em solos arenosos e silto-arenosos.

O grau de saturação ( $S_r$ ) assume também uma importância considerável na definição desta propriedade térmica. Para um dado valor de índice de vazios verifica-se que um solo sofre um aumento no seu valor de condutividade térmica com o aumento do grau de saturação, devido à substituição total ou parcial do ar que preenche os espaços intersticiais por água. Ao ocorrer esta troca, entre dois materiais com condutividade tão distintas, observa-se um aumento da capacidade para transferir calor por parte do solo. A água intersticial funciona como ponte de ligação entre as partículas sólidas. Estas ligações, designadas como pontes térmicas, permitem um aumento de eficácia no processo de transferência de energia (Figura 4.1).

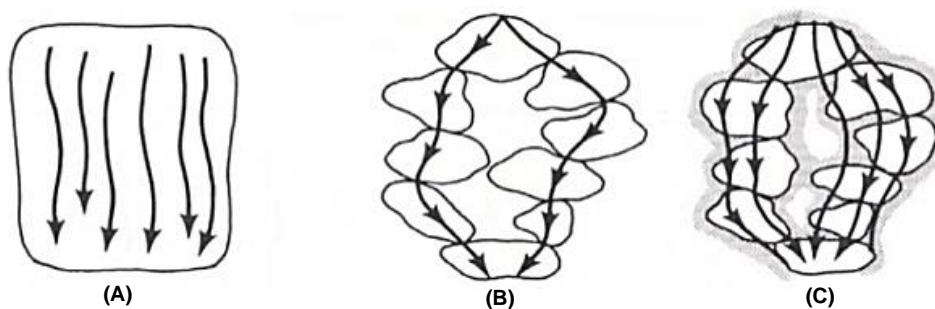


Figura 4.1 Fluxo de calor numa rocha (A) e num solo seco (B) e saturado (C), adaptado de Hillel (1998)

Com base nos estudos realizados por autores como Bristow (1998), Drefke *et al.* (2013) e Nikolaev *et al.* (2013) é possível concluir-se que no caso das areias, a sensibilidade ao aumento do grau de saturação é maior quando o volume de água no solo é mais reduzido. Para graus de saturação, sensivelmente superiores a 10-20%, observam-se variações menos expressivas na condutividade térmica quando se aumenta o valor deste índice físico. No caso das argilas, o comportamento face ao aumento do grau de saturação tende a apresentar um comportamento mais regular.

Na Figura 4.2 apresentam-se resultados obtidos por Barry-Macaulay *et al.* (2013) para a condutividade térmica em função do grau de saturação para diferentes tipos de solos. É possível observar os diferentes comportamentos da condutividade térmica dos solos, face ao incremento do grau de saturação. As areias, apresentam claramente uma mudança de comportamento para teores em água entre os 10%-15%, mudança essa que é menos proeminente à medida que a quantidade de argila se torna mais significativa. No caso dos solos onde existe concomitância de argilas e areias a mudança de comportamento é observável para teores em água mais elevados. No caso dos solos finos (predominância de siltes e argilas) a mudança existe, ainda que de forma menos marcada, sendo observada apenas para graus de saturação próximos de 70%.



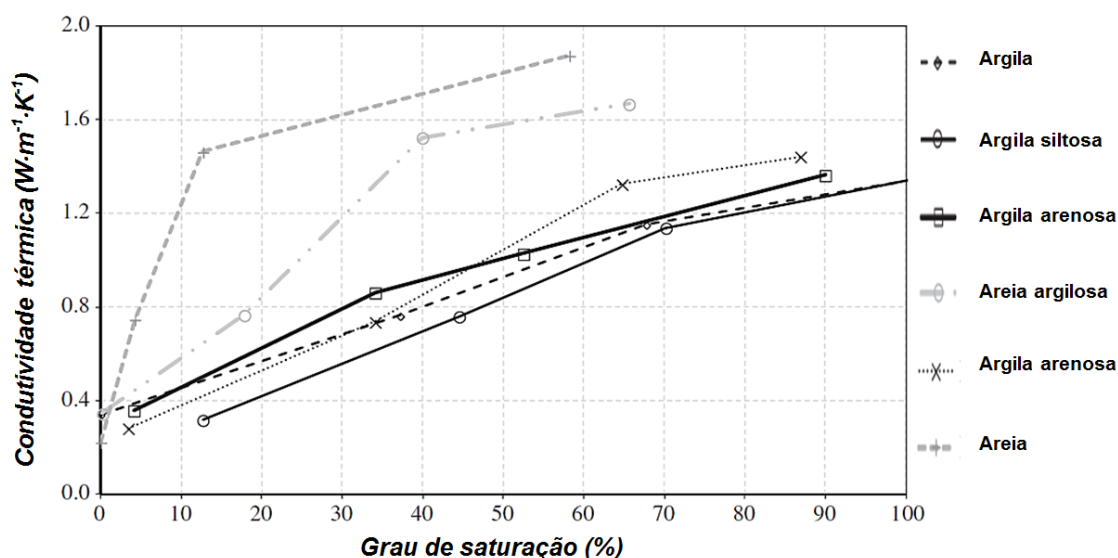


Figura 4.2 Variação da condutividade térmica com o grau de saturação, adaptado de Barry-Macaulay *et al.* (2013)

Também o estado físico da água intersticial tem influência no valor de condutividade térmica. Segundo Brandl (2006) e Rees *et al.* (2000), a passagem da água intersticial do estado líquido para o estado sólido favorece um incremento generalizado da condutividade térmica efectiva. Assim, é possível afirmar que os solos com água intersticial no estado sólido (solos congelados) apresentam valores de  $\lambda$ , superiores a solos com água intersticial no estado líquido (solos não congelados).

Na Tabela 4.2 apresentam-se sintetizados alguns valores de condutividade térmica dos solos mais comuns. Estes valores indicativos ilustram de forma clara os aspectos expostos anteriormente.

Tabela 4.2 Condutividade térmica de alguns solos segundo a norma alemã VDI, adaptado de McCorry e Jones (2011)

Solo		Condutividade térmica ( $\lambda$ ) ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
Argila siltosa	Seca	0,4 – 1,0
	Saturada	1,1 – 3,1
Areia	Seca	0,3 – 0,9
	Húmida	1,0 – 1,9
	Saturada	2,0 – 3,0
Cascalho	Seco	0,4 – 0,9
	Saturado	1,6 – 2,5
Tilitos		1,1 – 2,9
Turfa		0,2 – 0,7

### 4.3. Resistividade térmica

A resistividade térmica ( $r$ ) do solo expressa  $\text{m}\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$ , é definida como uma medida da resistência à passagem de energia térmica (Singh e Devid, 2000). Corresponde ao inverso da condutividade, definindo-se como:

$$r = \frac{1}{\lambda} \quad (4.1)$$

Esta é uma propriedade que depende de grandezas básicas do solo tal como acontece com a condutividade térmica. Segundo Singh e Devid (2000), os solos exibem maior resistividade térmica quando secos, em virtude do ar que preenche os poros apresentar maior resistividade comparativamente à água. Sob o ponto de vista mineralógico, verifica-se que os mais ricos em minerais de quartzo, como as areias, apresentam menores resistividades térmicas. Os minerais de argila e a matéria orgânica apresentam elevada resistividade térmica. A sua presença nos solos é por isso um factor de aumento nesta propriedade.

### 4.4. Capacidade térmica

A capacidade térmica  $C$ , expressa em  $\text{J}\cdot\text{K}^{-1}$ , define-se segundo Jewett (2004), como a quantidade de energia térmica que é necessário fornecer a uma dada substância para provocar um aumento na sua temperatura de 1K. Pode exprimir-se através da equação (4.2).

$$C = \frac{Q}{\Delta T} \quad (4.2)$$

em que  $Q$  é o calor transferido em J, e  $\Delta T$  é a variação de temperatura em K.

A capacidade térmica dos solos é influenciada pela sua composição mineralógica, teor em matéria orgânica e teor em água, sendo o último o mais preponderante (Wierenga 1969, citado em Abu-Hamdeh, (2003)). Com base nesta propriedade e na massa volúmica do solo é possível determinar o calor específico e a capacidade térmica volumétrica. Qualquer uma delas é amplamente utilizada no que concerne à caracterização do comportamento térmico do solo especialmente em condições de regime variável de condução de calor.

#### 4.4.1. Calor específico ou capacidade térmica mássica

O calor específico  $c$  expresso em  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , constitui um importante parâmetro a determinar quando são realizados estudos em regime variável. Define-se como a quantidade de energia armazenada num material por unidade de variação de temperatura e massa (Brandl, 2006). Banks (2012) define-o como uma medida da capacidade que os solos apresentam para armazenar calor. Com base nesta última definição, torna-se evidente a importância desta propriedade nos GES. O calor específico é obtido de acordo com a seguinte expressão:

$$c = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (4.3)$$

em que  $m$  é a massa em kg. Reescrevendo a equação (4.2) em ordem a  $Q$  e substituindo em (4.3) obtém-se:

$$c = \frac{C}{m} \quad (4.4)$$

De onde se conclui que esta propriedade térmica pode ser descrita como a capacidade térmica por unidade de massa. Podendo também ser também definida como a quantidade de energia necessária para elevar em um grau um quilograma de material.

À semelhança da condutividade térmica, Abu-Hamdeh (2003) refere que o calor específico é dependente de diversos factores, diferenciando-os em dois grandes grupos. Um, onde inclui aqueles que são intrínsecos ao material e outro onde são incluídos os que podem ser controlados. Com base nos seus estudos laboratoriais, o autor afirma que o calor específico dos solos argilosos e arenosos aumenta com o teor em água, apresentando comportamento linear para teores em água superiores a 15%. As argilas, quando sujeitas a teores em água mais elevados, tendem a sofrer aumentos no seu calor específico mais expressivos que as areias. A matéria orgânica é outro dos factores preponderantes na definição desta propriedade térmica. Segundo Lawrence e Slater (2008) os solos orgânicos apresentam calor específico mais elevado que os solos minerais. Na Tabela 4.3, registam-se os intervalos de referência de calor específico para alguns tipos de solo.

**Tabela 4.3 Calor específico de alguns solos determinado com base nos valores apresentados na norma alemã VDI 4640, disponíveis em McCorry e Jones (2011)**

Solo		Calor específico ( $c$ ) (J·Kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
Argila siltosa	Seca	800 – 830
	Saturada	1000 – 1273
Areia	Seca	722 – 727
	Húmida	842 – 1000
	Saturada	1158 – 1217
Cascalho	Seco	722 – 727
	Saturado	1578 – 1130
Tilitos		83 – 1087
Turfa		1000 – 3455

Se na equação (4.3) se conhecer  $c$ , é possível determinar qual a quantidade de energia térmica que é retirada ou adicionada a 1kg de solo, quando este sofre uma variação de temperatura  $\Delta T$ . Para isso basta reescrever a referida expressão em ordem a  $Q$ :

$$Q = c \cdot m \cdot \Delta T \quad (4.5)$$

Com base na equação anterior é possível afirmar que quanto maior o calor específico, maior quantidade de energia é necessário retirar ou fornecer ao solo para que este aumente ou diminua de temperatura. Ou, por outro lado, quanto maior o valor desta propriedade maior será a quantidade de energia térmica armazenada por unidade de massa.

O calor específico do solo pode obtido por estimação, utilizando para isso algumas expressões disponíveis na bibliografia que utilizam o calor específico de cada um dos constituintes de cada fase do solo. Estas metodologias não se substituem à determinação da propriedade com base em métodos laboratoriais ou *in situ*. De entre as diferentes metodologias existentes, a apresentada na equação (4.6) é sem dúvida a mais utilizada.

$$c_{solo} = x_a \cdot c_a + x_s \cdot c_s + x_w \cdot c_w \quad (4.6)$$

onde  $c_a$ ,  $c_w$  e  $c_s$  são os calores específicos das três fases do solo e  $x_a$ ,  $x_w$  e  $x_s$  as respectivas fracções volumétricas. Caso seja necessário é possível adicionar termos à equação, bastando para isso conhecer as fracções volumétricas e respectivos calores específicos dos constituintes adicionados. A adição torna-se no caso dos solos especialmente útil quando se pretende diferenciar os constituintes da fracção sólida. Na Tabela 4.4 apresentam-se os valores de calor específico geralmente utilizados para aplicação das formulações apresentadas anteriormente.

**Tabela 4.4 Valores de calor específico para os diferentes constituintes do solo**

Substância	Calor específico ( $c$ ) (J·Kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
Quartzo	799 <sup>a)</sup>
Ortoclase	812 <sup>a)</sup>
Moscovite	870 <sup>a)</sup>
Biotite	862 <sup>a)</sup>
Minerais de argila	2010 <sup>a)</sup>
Matéria orgânica	1923 <sup>b)</sup>
Água	4186 <sup>c)</sup>
Gelo	1884 <sup>c)</sup>
Ar	1012 <sup>d)</sup>

**a)**Segundo Rees et al. (2000), **b)**Segundo Hillel (1998), **c)**Segundo Brandl (2006) e **d)**Segundo Vieira e Maranhã (2009)

#### 4.4.2. Capacidade térmica volumétrica

A capacidade térmica volumétrica ( $C_v$ ) expressa em  $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ , pode ser definida como a quantidade de energia necessária para elevar em um grau Kelvin, um metro cúbico de material. Segundo Dickinson *et al.* (2009), existe armazenamento de energia térmica tanto na fracção sólida como líquida, logo a capacidade térmica volumétrica depende das propriedades térmicas de ambas. Segundo Hillel (1998), o contributo da fracção gasosa pode ser desprezado por apresentar um valor extremamente baixo. A capacidade térmica volumétrica corresponde ao produto da capacidade térmica mássica ( $c$ ) pela massa volúmica ( $\rho$ ) (equação (4.7)).

$$C_v = \rho \cdot c \quad (4.7)$$

ou ainda, como o quociente entre a condutividade e difusidade térmica (ver secção 4.7), como apresentado na equação (4.8).

$$C_v = \frac{\lambda}{\alpha} \quad (4.8)$$

Regra geral, os solos apresentam capacidades térmicas volumétricas próximas (Tabela 4.5), pois o calor específico e massa volúmica variam pouco de solo para solo, até mesmo no caso dos ricos em matéria orgânica. Estes, apesar do seu calor específico superior apresentam massa volúmica baixa, mantendo-se por isso dentro do intervalo esperado para a generalidade dos casos.

**Tabela 4.5 Capacidade térmica volumétrica de alguns solos segundo a norma alemã VDI 4640, adaptado de McCorry e Jones (2011)**

Solo		Capacidade Térmica Volumétrica ( $C_v$ ) ( $\text{kJ}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ )
Argila siltosa	Seca	1500 – 1600
	Saturada	2000 – 2800
Areia	Seca	1300 – 1600
	Húmida	1600 – 2200
	Saturada	2200 – 2800
Cascalho	Seco	1300 – 1600
	Saturado	2200 – 2600
Tilitos		1500 – 2500
Turfa		500 – 3800

Abu-Hamdeh (2003) e Rubio *et al.* (2011) estudaram o comportamento da capacidade térmica volumétrica face às variações de teor em água e massa volúmica. Os autores ao realizarem estudos sobre amostras de solos arenosos, argilosos e areno-argilosos, verificaram que aumentos sucessivos

no teor em água resultam em incrementos da capacidade térmica volumétrica. Para o primeiro autor, os solos argilosos e arenosos com uma dada massa volúmica, exibem uma relação linear entre o teor em água e a capacidade térmica volumétrica. Por outro lado, Rubio *et al.* (2011), refere no seu trabalho realizado sobre amostras de solo areno-argiloso, que a existência de linearidade apenas se verifica para teores em água inferiores a 10%. Segundo Abu-Hamdeh (2003) a capacidade térmica volumétrica do solo aumenta com o aumento da sua massa volúmica. Tal facto é resultado do aumento da quantidade de matéria sólida por unidade de volume.

Segundo Farouki (1981) a capacidade térmica volumétrica de um solo ( $C_{v,solo}$ ) pode ser obtida tendo por base a aplicação da equação (4.9). O valor é obtido em função do peso volúmico seco do solo  $\gamma_d$ , do peso volúmico da água  $\gamma_w$ , do teor em água  $\omega$  e da capacidade térmica volumétrica da água  $C_{v,w}$ .

$$C_{v,solo} = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot C_{v,w} \cdot \left(0,18 + \frac{\omega}{100}\right) \quad (4.9)$$

Hillel (1998) sugere uma metodologia diferente da anterior, baseada no conceito de média ponderada. A capacidade térmica volumétrica do solo é então determinada utilizando as fracções volumétricas de cada constituinte do solo e respectivas capacidades térmicas volumétricas. Em caso de necessidade, é possível diferenciar a fracção sólida por forma a contabilizar as diferentes mineralogias e matéria orgânica. Na equação (4.10) apresenta-se a expressão para determinação da  $C_{v,solo}$  com diferenciação da componente mineral e orgânica.

$$C_{v,solo} = x_o \cdot C_{v,o} + x_m \cdot C_{v,m} + x_w \cdot C_{v,w} \quad (4.10)$$

onde  $x_o$ ,  $x_m$  e  $x_w$  são respectivamente as fracções orgânica, mineral e líquida e  $C_{v,m}$  e  $C_{v,o}$  são as capacidades térmicas volumétricas da matéria mineral e orgânica. Ao desprezar a fracção de ar, à que ter em atenção que  $x_o + x_m + x_w = 1 - x_a$ , onde  $x_a$  corresponde à fracção volumétrica de ar no solo.

A metodologia de estimação reformulada por Saito *et al.* (2014) permite obter a propriedade em apreço em condições de saturação, recorrendo apenas ao teor em água do solo. Para isso é utilizada a equação (4.11), cujos resultados obtidos são dados em  $\text{kJ} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ .

$$C_{v,solo} = [4,20 \cdot \omega + 1,93 \cdot (1 - \omega)] \cdot 10^3 \quad (4.11)$$

A formulação anterior tem por base a expressão inicialmente proposta por De Vries em 1963, onde se incluía o teor em matéria orgânica. Segundo o autor citado esta é a expressão mais utilizada em estudos geotérmicos para a estimação da capacidade térmica volumétrica.

#### 4.5. Difusividade térmica

A difusividade térmica  $\alpha$  ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) descreve a profundidade e a velocidade de propagação da onda térmica no solo (Brandl, 2006). É especialmente utilizada quando se trata de problemas em regime não estacionário. Segundo Farouki (1981) e Kodikara *et al.* (2011) a difusividade térmica pode ser

escrita como o quociente entre a condutividade térmica ( $\lambda$ ) e a capacidade térmica volumétrica ( $C_v$ ), (equação(4.12)). Ao ser definida desta forma, a sua variação depende do comportamento conjugado destas duas propriedades térmicas. Regra geral os solos arenosos são aqueles que apresentam maior difusividade térmica.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{\lambda}{C_v} \quad (4.12)$$

Como referido por Tidall *et al.* (1999) este parâmetro é de grande importância, para a previsão do comportamento do fluxo térmico no solo. A reduzida difusividade térmica dos solos, é a explicação para a influência diminuta das oscilações diárias de temperatura na temperatura do solo em profundidade. Na Tabela 4.6 apresentam-se os intervalos de referência para diferentes tipos de solos, determinados com base na equação (4.12), utilizando os valores de condutividade térmica e capacidade térmica volumétrica apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.5.

**Tabela 4.6 Difusividade térmica para diferentes tipos de solos, determinada com base nos valores de condutividade térmica e capacidade térmica volumétrica disponíveis na norma alemã VDI 4640, disponíveis em McCorry e Jones (2011)**

Solo		Difusividade térmica ( $\alpha$ ) ( $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ )
Argila siltosa	Seca	$2,67 \cdot 10^{-7} - 6,25 \cdot 10^{-7}$
	Saturada	$5,50 \cdot 10^{-7} - 1,11 \cdot 10^{-6}$
Areia	Seca	$2,31 \cdot 10^{-7} - 5,63 \cdot 10^{-7}$
	Húmida	$6,25 \cdot 10^{-7} - 8,64 \cdot 10^{-7}$
	Saturada	$9,09 \cdot 10^{-7} - 1,07 \cdot 10^{-6}$
Cascalho	Seco	$3,08 \cdot 10^{-7} - 5,63 \cdot 10^{-7}$
	Saturado	$7,27 \cdot 10^{-7} - 9,62 \cdot 10^{-7}$
Tilitos		$7,33 \cdot 10^{-7} - 1,16 \cdot 10^{-6}$
Turfa		$4,00 \cdot 10^{-7} - 1,84 \cdot 10^{-7}$

Tal como as propriedades anteriormente referidas, também a difusividade térmica é influenciada pelas propriedades básicas dos solos. A relação entre o teor em água e a referida propriedade térmica não é linear. Abu-Hamdeh (2003), verificou durante os seus trabalhos que os solos arenosos, partindo de teores em água reduzidos sofrem inicialmente uma grande variação na difusividade térmica, atingindo rapidamente um valor de pico (Figura 4.3). Após este, desce abruptamente até alcançar um valor quase constante, mas cada vez mais pequeno até que seja atingida total saturação. Tal facto é explicado por Williams e Smith (1989) como resultado do crescimento mais rápido da condutividade térmica relativamente à capacidade térmica volumétrica, quando se faz variar o grau de saturação do solo próximo do seu estado seco. Para graus de saturação mais elevados, correspondentes a

$S_r > 15 - 20 \%$ , como já referido anteriormente, a condutividade térmica tende a diminuir a sua sensibilidade a variações de teor em água. Por outro lado, a capacidade térmica volumétrica mantém a sua taxa de crescimento praticamente constante. Deste facto, resulta um comportamento diferente, por parte da difusividade térmica em relação ao aumento do teor em água. A difusividade térmica passa a decrescer com o teor em água, ainda que de forma muito ténue. Contrariamente ao referido para as areias, para as argilas não se verificam variações de comportamento. Os aumentos no teor em água provocam um aumento regular na difusividade térmica, apresentando a partir de determinado valor comportamento assintótico (Figura 4.3). Sempre que o solo resulta da mistura de diferentes mineralogias, há que ter em conta que o comportamento pode variar.

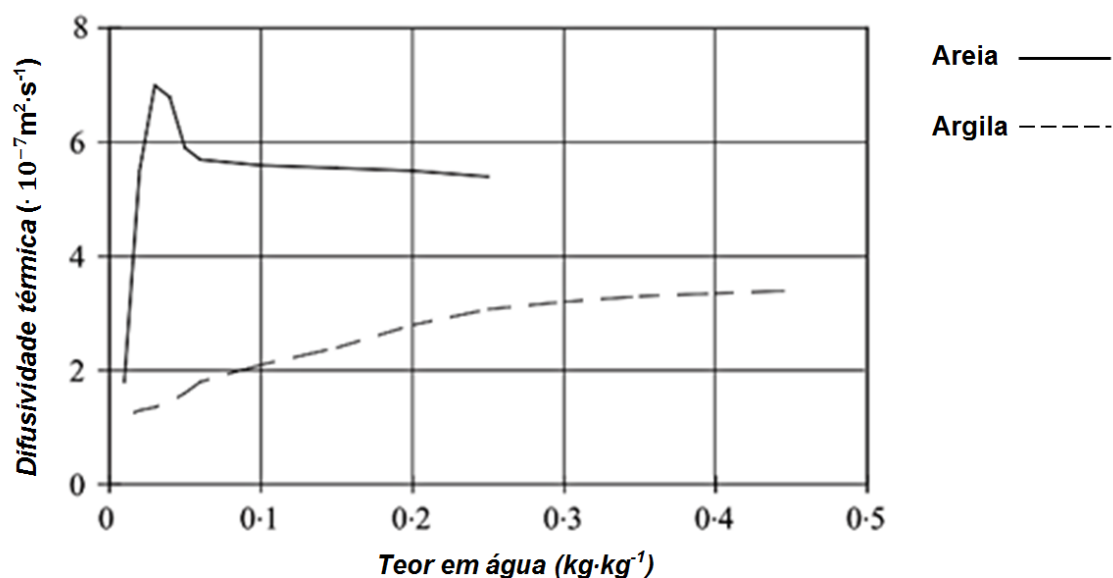


Figura 4.3 Relação entre a difusividade térmica e o teor em água para um solo arenoso e outro argiloso, adaptado de Abu-Hamdeh (2003)

A massa volúmica é outra das propriedades que condiciona a difusividade térmica. A relação entre estas duas propriedades não é simples de avaliar. A difusividade para além de influenciada pela massa volúmica é também afectada pela condutividade térmica e calor específico, estas também variáveis em função da massa volúmica. Desta forma, considerando o teor em água constante, é possível afirmar que a difusividade térmica aumenta ou diminui em função das taxas de crescimento da condutividade térmica e capacidade térmica volumétrica. Caso o valor de  $C_v$  aumente mais que  $\lambda$  quando se sujeita o solo a um aumento da sua massa volúmica, verifica-se uma diminuição na difusividade, caso contrario ocorrerá um aumento.

Segundo Farouki, (1981) a difusividade térmica é substancialmente maior quando o solo se encontra congelado, pois com a mudança de estado, a água aumenta de condutividade térmica e diminui de capacidade térmica volumétrica.





## 5. Caracterização térmica de solos

### 5.1. Considerações iniciais

Para a correcta avaliação dos fluxos térmicos e quantidade de energia transferida, importa realizar a caracterização térmica dos solos, através da obtenção das principais propriedades que definem o seu comportamento. Os seus valores podem ser obtidos através de ensaios térmicos ou de fórmulas empíricas ou semi-empíricas, amplamente difundidas na bibliografia. Com o objectivo de estimar o valor de condutividade térmica, diversos autores tem vindo a desenvolver estudos experimentais para obtenção de expressões que permitem estimar o valor de condutividade térmica. Destacam-se os trabalhos e métodos de De Vries (1952), Johansen (1975) e Cotê e Konrad (2005). Estas metodologias, ainda que constituam soluções razoáveis, não traduzem as condições particulares de cada local e material a estudar. A caracterização experimental, baseada em ensaios de laboratório ou *in situ*, permite determinar com maior fiabilidade as propriedades térmicas dos solos, bem como avaliar qual a sua sensibilidade aos parâmetros geológicos e geotécnicos já enunciados anteriormente. A caracterização com recurso a ensaios de laboratório ou de campo, confere aos resultados obtidos maior representatividade, na medida em que são consideradas as características específicas do material a utilizar como fonte ou dissipador de calor. Estes ensaios derivam em grande parte de metodologias já aplicadas a outro tipo de materiais utilizados nas mais diversas áreas da engenharia, nomeadamente no que se refere à caracterização térmica de materiais de isolamento.

Com o conhecimento adequado das grandezas térmicas referidas no capítulo antecedente e considerando as condições geológicas e geotécnicas locais, é possível avaliar e projectar aproveitamentos geotérmicos de baixa entalpia mais eficientes.

### 5.2. Métodos empíricos

Os métodos empíricos disponíveis na bibliografia permitem, essencialmente, determinar a condutividade térmica  $\lambda$  do solo tendo por base as suas diferentes propriedades geológicas e geotécnicas, a que se juntam as propriedades térmicas dos materiais constituintes de cada fracção.

Geralmente a sua aplicação está condicionada ao conhecimento da percentagem de volume de cada uma das fases do solo. Noutras, é ainda necessário conhecer com detalhe as mineralogias e qual a sua percentagem relativa ao total da fase sólida.

### 5.2.1. Estimação da condutividade térmica

#### 5.2.1.1 Método das médias aritmética, harmónica e geométrica

Os métodos de estimação de condutividade térmica com base nas médias aritméticas, harmónica e geométrica, ponderadas pelas percentagens volumétricas de cada um dos constituintes do solo, constituem as metodologias mais simples do ponto de vista da sua aplicação. Na sua base está a consideração de diferentes arranjos espaciais para as fases sólida, líquida e gasosa.

Segundo Rees *et al.* (2000), a média aritmética assume uma distribuição dos constituintes do solo paralela à direcção de fluxo. A condutividade térmica é obtida pela soma das condutividades dos diferentes constituintes do solo, ponderadas pela sua fracção volumétrica (equação (5.1)). Os valores determinados constituem sobrestimações da condutividade térmica real.

$$\lambda_{est} = x_s \cdot \lambda_s + x_w \cdot \lambda_w + x_a \cdot \lambda_a \quad (5.1)$$

em que  $x_s$ ,  $x_w$  e  $x_a$  são as fracções volumétricas sólida, líquida e gasosa respectivamente, e  $\lambda_s$ ,  $\lambda_w$  e  $\lambda_a$  as correspondentes condutividades térmicas. Estas fracções podem ser escritas como função da porosidade e grau de saturação, utilizando para isso as expressões:

$$x_s = 1 - n \quad (5.2)$$

$$x_w = n \cdot S_r \quad (5.3)$$

$$x_a = n \cdot (1 - S_r) \quad (5.4)$$

A equação (5.1) pode ser generalizada para  $i$  constituintes do solo, passando a ser escrita como:

$$\lambda_{est} = \sum x_i \cdot \lambda_i \quad (5.5)$$

em que  $x_i$  e  $\lambda_i$  são respectivamente a fracção volumétrica e a condutividade térmica da fracção  $i$ .

A média harmónica constitui outra das soluções para a estimação da condutividade térmica. Considerando uma distribuição em série dos constituintes das diferentes fracções, a condutividade térmica de um solo é dada por:

$$\lambda_{est} = \frac{\lambda_s \cdot \lambda_w \cdot \lambda_a}{x_s \cdot \lambda_w \cdot \lambda_a + x_w \cdot \lambda_a \cdot \lambda_s + x_a \cdot \lambda_s \cdot \lambda_w} \quad (5.6)$$

Esta formulação subestima a condutividade térmica real.

A metodologia de cálculo pela média geométrica foi proposta pela primeira vez por Woodside e Messmer em 1961 (Cosenza *et al.*, 2003). Inicialmente foi desenvolvida para solos saturados, sendo

a expressão escrita apenas em função das condutividades térmicas das frações sólida e líquida, e da porosidade (equação (5.7)).

$$\lambda_{est} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_w^n \quad (5.7)$$

Mais tarde, Rees *et al.* (2000) propuseram a aplicação da média geométrica considerando todos os constituintes do solo, onde incluíram os diferentes minerais constituintes da fração sólida. Desta construção matemática, resulta um valor estimado de condutividade intermédio.

Matematicamente a expressão da condutividade térmica calculada com base na média geométrica é dada pela equação (5.8).

$$\lambda_{est} = \prod_{i=1}^n \lambda_i^{x_i} \quad (5.8)$$

De forma a ilustrar os resultados obtidos recorrendo às expressões anteriormente referidas considere-se uma areia teoricamente apenas composta por quartzo e ar. Ao variar a porosidade entre zero e um, obtém-se os valores de condutividade ilustrados na Figura 5.1. De notar que nas situações teóricas limite (em que a porosidade é igual a um ou a zero) verifica-se que, para o primeiro caso a condutividade térmica calculada é igual ao valor de condutividade térmica do ar, para o segundo cenário o valor de cálculo é igual ao valor de condutividade térmica do quartzo.

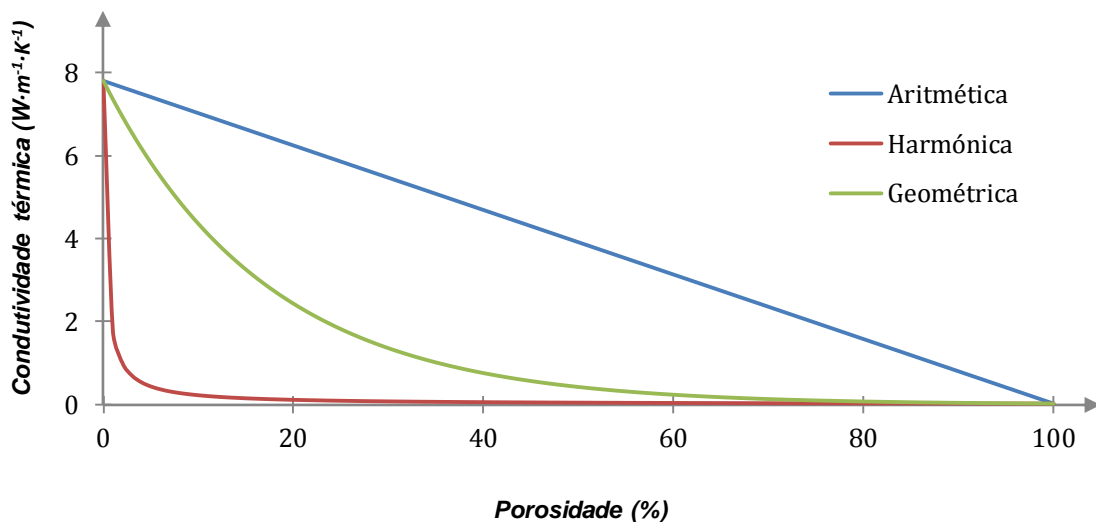


Figura 5.1 Variação da condutividade térmica com a porosidade de uma areia de quartzo puro e  $S_r = 0\%$ , com base nos métodos da média aritmética, geométrica e harmónica, baseado em Rees *et al.* (2000)

### 5.2.1.2 Método de De Vries (1952)

O método de De Vries teve como base os trabalhos realizados por Maxwell, Eucken e Fricke. De Vries, em 1952, adaptou o modelo de Fricke por forma a aplicá-lo na estimação da condutividade térmica de solos com teor em água diferente de zero. Neste método de estimação, as partículas são consideradas como elipsóides oblatos, dispersos num meio fluido contínuo (água ou ar) (Tarnawski e Leong, 2012). Tem por base os diferentes constituintes de cada fase do solo, o volume por eles

ocupado e o seu calor específico. Frob (2011) refere que o volume total deve ser suficientemente grande relativamente ao volume de partículas sólidas para que possam ser desprezadas as heterogeneidades existentes à microescala.

A equação de cálculo da condutividade térmica, segundo o método de De Vries, é escrita como (Tarnawski e Leong, 2012):

$$\lambda_{est} = \frac{z_w \cdot x_w \cdot \lambda_w + \sum_{i=1}^n z_i \cdot x_i \cdot \lambda_i + z_a \cdot x_a \cdot \lambda_a}{z_w \cdot x_w + \sum_{i=1}^n z_i \cdot x_i + z_a \cdot \lambda_a} \quad (5.9)$$

em que  $z_i$ ,  $z_w$  e  $z_a$  são factores de ponderação, dependentes de um factor de forma das partículas ( $g_i$ ), da condutividade térmica do meio fluido contínuo e da condutividade térmica da fracção sólida.

A determinação do factor de ponderação é possível se, como já referido, for assumido que os grãos apresentam forma elipsoidal e afastamento tal, que a influência entre si não se verifica. Garantidas tais condições,  $z_n$  pode ser obtido para qualquer fracção por:

$$z_n = \frac{1}{3} \cdot \left[ \frac{2}{1 + \left( \frac{\lambda_i}{\lambda_o} - 1 \right) \cdot g_i} + \frac{1}{1 + \left( \frac{\lambda_i}{\lambda_o} - 1 \right) \cdot (1 - 2 \cdot g_i)} \right] \quad (5.10)$$

onde  $\lambda_o$  é a condutividade térmica do meio fluido contínuo (ar ou água). A selecção da fracção líquida ou gasosa como meio fluido contínuo é realizada recorrendo ao teor em água do solo e ao teor em água crítico. Este último corresponde ao valor para o qual existe mudança de meio fluido. No caso dos solos granulares e finos esses teores são respectivamente 3% e 5%–10% (Tarnawski e Leong, 2012). Na Tabela 5.1 apresentam-se os intervalos de teor em água para os quais a água ou o ar, em função do tipo de solo, são assumidos como meios fluidos contínuos.

**Tabela 5.1 Variação do meio fluido em função do tipo de solo e teor em água crítico segundo Tarnawski e Leong (2012)**

Meio Fluido	Solos Finos (%)	Solos granulares (%)
Ar	0 – 10	0 – 3
Água	10 – $\omega_{sat}$	3 – $\omega_{sat}$

Segundo De Vries, para solos granulares, a determinação do ponderador da fracção sólida pode ser realizada adoptando um  $g_i$  igual a 0,144. No caso dos solos siltosos e argilosos, o autor sugere que  $g_i$  para a fracção sólida tome o valor de 0,125. No que concerne à fracção líquida, é razoável que em ambos os casos se adoptem valores de  $g_i$  iguais 0,144 (Tarnawski e Leong, 2012). O ponderador aplicado à parcela correspondente à fracção gasosa é obtido com base na fracção volumétrica de água no solo e no seu teor em água saturado. Na generalidade dos casos, o valor de  $g_i$  para a fracção gasosa é dado pela equação (5.11)

$$g_{i,ar} = 0,333 - 0,298 \cdot \frac{x_w}{\omega_{sat}} \quad (5.11)$$

onde  $\omega_{sat}$  é o teor em água do solo saturado.

Para Farouki (1981) e Fricke *et al.* (1992), esta metodologia de cálculo é aplicável a solos granulares com saturação entre os 10%–20%, o segundo autor refere ainda a utilização para solos finos saturados. Segundo Hillel (1998) o método de De Vries fornece resultados adequados, existindo maiores discrepâncias entre o valor real e estimado, para teores em água próximos do estado seco. Nos solos com teores em água mais elevados, próximos do estado saturado, são menos pronunciadas.

### 5.2.1.3 Método de Makowski e Mochlinski (1956)

O método desenvolvido por Makowski e Mochlinski teve por base resultados obtidos em laboratório. A estimação da condutividade térmica é realizada recorrendo ao teor em água, peso volúmico seco e percentagem de argila no solo.

A estimação utiliza variáveis auxiliares determinadas através das equações (5.13) a (5.15) que permitem relacionar empiricamente a condutividade com as propriedades anteriormente referidas. Por sua vez, a condutividade é estimada através da equação (5.12) (Rees *et al.*, 2000).

$$\lambda = (a \cdot \log \omega_p + b) \cdot 10^z \quad (5.12)$$

$$a = 0.1424 - 0.000465 \cdot p \quad (5.13)$$

$$b = 0.0419 - 0.000313 \cdot p \quad (5.14)$$

$$z = 6.24 \cdot \rho_d \cdot 10^{-4} \quad (5.15)$$

onde  $\omega_p$  é o teor em água definido como percentagem da massa volúmica seca,  $\rho_d$  é a massa volúmica seca e  $p$  a percentagem de argila no solo.

### 5.2.1.4 Método de Johansen (1975)

Permite a estimação do valor de condutividade térmica de solos granulares grosseiros ou finos cujo grau de saturação é superior a 20%. Fricke *et al.* (1992), refere que, para valores de  $S_r$  inferiores a 20%, a estimação é inferior ao valor real em cerca de 15%.

Segundo Yun e Santamarina (2007), a aplicação desta metodologia de estimação requer o conhecimento da massa volúmica do solo, grau de saturação, dimensão das partículas e condutividade térmica da fracção sólida. A estimação da condutividade do solo é realizada em função da sua condutividade nos estados seco e saturado, respectivamente  $\lambda_d$  e  $\lambda_{sat}$ , determinadas para igual massa volúmica seca,  $\rho_d$  (Farouki, 1981). Com base nestes dois valores extremos, a condutividade térmica real é então estimada recorrendo à condutividade térmica normalizada, também designada por Número de Kersten,  $K_e$ :

$$K_e = \frac{\lambda_{est} - \lambda_d}{\lambda_{sat} - \lambda_d} \quad (5.16)$$

onde  $\lambda_{est}$  é a condutividade térmica a determinar. Johansen verificou que para o caso de solos secos, a condutividade térmica é significativamente influenciada pelo valor de  $\rho_d$ . Em virtude de tal constatação definiu que para solos naturais, o valor de  $\lambda_d$  pode ser obtido aplicando a equação semi-empírica (5.17).

$$\lambda_d = \frac{0,135 \cdot \rho_d + 64,7}{2700 - 0,947 \cdot \rho_d} \pm 20\% \quad (5.17)$$

A influência da massa volúmica seca na condutividade térmica do solo saturado não é tão proeminente. Desta forma propôs a aplicação de uma média geométrica, tendo por base as condutividades térmicas de cada um dos constituintes do solo e as respectivas quantidades em termos volumétricos, tal como se indica na equação (5.18).

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{(1-n)} \cdot \lambda_w^n \quad (5.18)$$

em que  $n$  é a porosidade,  $\lambda_w$  é a condutividade térmica da fase líquida (água) e  $\lambda_s$  é a condutividade térmica da fase sólida. O valor de  $\lambda_s$  pode ser obtido através da média geométrica das condutividades dos diferentes minerais constituintes da fracção sólida, ponderados pelas suas fracções volumétricas. Alternativamente é possível a determinação deste valor recorrendo ao método inicialmente proposto por Johansen. Nesse caso deve considerar-se um valor genérico para a condutividade dos diferentes minerais, diferenciando destes o quartzo. A expressão a utilizar é, segundo Farouki (1981), dada por:

$$\lambda_s = \lambda_{qz}^{x_{qz}} \cdot \lambda_{minerais}^{1-x_{qz}} \quad (5.19)$$

onde  $\lambda_{qz}$  é a condutividade térmica do quartzo,  $\lambda_{minerais}$  a condutividade térmica dos restantes minerais e  $x_{qz}$  a fracção volumétrica de quartzo no total da fracção sólida

A estimacão para a condutividade térmica do solo,  $\lambda_{est}$ , é determinada recorrendo à manipulação da equação (5.16). Reescrevendo aquela expressão em ordem a  $\lambda_{est}$  obtém-se a equação (5.20).

$$\lambda_{est} = K_e \cdot (\lambda_{sat} - \lambda_d) + \lambda_d \quad (5.20)$$

O Número de Kersten é determinado pelas equações (5.21) e (5.22) para solos granulares com  $S_r$  superior a 5% e para solos finos com  $S_r$  superior a 10%, respectivamente.

$$K_e \cong 0.7 \log_{10}(S_r) + 1,0 \text{ com } S_r \geq 5\% \quad (5.21)$$

$$K_e \cong \log_{10}(S_r) + 1,0 \text{ com } S_r \geq 10\% \quad (5.22)$$

A metodologia acima referida tem em consideração solos cuja composição exhibe apenas materiais minerais, água e ar. Porém, nas zonas mais superficiais da crosta terrestre é comum a existência de materiais orgânicos que podem constituir um importante volume na fracção total sólida do solo. Lawrence e Slater (2008) propõem a consideração desta fracção na estimacão pelo método de

Johansen da condutividade térmica do solo. Assim, segundo os referidos autores é necessário em primeiro lugar definir a fracção orgânica,  $x_{org}$ , que para um dado solo é dada pela equação (5.23).

$$x_{org} = \frac{\rho_{org}}{\rho_{org,max}} \quad (5.23)$$

onde  $\rho_{org}$  é a massa volúmica da fracção orgânica do solo e  $\rho_{org,max}$  é o valor máximo de massa volúmica para a fracção orgânica, valor este igual a  $130 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  definido em Farouki (1981).

A condutividade seca e saturada do solo com matéria orgânica, é determinada com recurso às equações (5.24) e (5.25).

$$\lambda_d = (1 - x_{org}) \cdot \lambda_m + x_{org} \cdot \lambda_{org} \quad (5.24)$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_m^{(1-n)} \cdot \lambda_w^n \quad (5.25)$$

onde  $\lambda_{org}$  e  $\lambda_m$  são as condutividades térmicas das fracções orgânica e mineral respectivamente. A condutividade térmica de toda a fracção sólida (matéria orgânica e mineral)  $\lambda_s$ , é obtida através da equação (5.26).

$$\lambda_s = (1 - x_{org}) \cdot \lambda_m + x_{org} \cdot \lambda_{org} \quad (5.26)$$

em que  $\lambda_{min}$  é a condutividade térmica da fracção inorgânica (mineral), obtida através da equação (5.27), e  $\lambda_{org}$  é a condutividade térmica da fracção orgânica, que segundo Farouki (1981) e Lawrence e Slater (2008) pode assumir o valor de  $0,05 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

$$\lambda_{s,m} = \frac{8,80 \cdot x_{areia} + 2,385 \cdot x_{argila}}{x_{areia} + x_{argila}} \quad (5.27)$$

onde  $x_{areia}$  e  $x_{argila}$  são as percentagens volumétricas de areia e argila na fracção sólida do solo.

Substituindo o valor de condutividade saturada e seca, considerando a existência de matéria orgânica na equação (5.20), é possível obter um valor de condutividade térmica do solo com matéria orgânica. De notar, que a aplicação desta metodologia apenas é viável quando existe um volume de matéria orgânica, cuja presença possa influenciar de algum modo a condutividade global.

#### 5.2.1.5 Método de Usowicz (1992)

O modelo de Usowicz constitui uma metodologia de cálculo da condutividade térmica cujas bases são no essencial conceitos físicos e estatísticos, com uma precisão associada entre  $\pm 5\%$  e  $\pm 10\%$  (Usowicz, 1992). Como referido por Usowicz *et al.* (2006), apresenta aplicabilidade à generalidade dos solos e carece do conhecimento de alguns parâmetros facilmente obtidos em ensaios correntes executados neste tipo de materiais

A idealização do modelo é baseada na analogia entre o fluxo de calor, descrito pela lei de Fourier, e o fluxo de corrente eléctrica, descrito pela lei de Ohm, sendo expresso em termos do conceito de resistência térmica  $R_{th}$ . O referido autor assemelha a diferença de potencial  $U$  ao gradiente de



temperatura  $\Delta T$ , o fluxo de calor  $\dot{q}$  à intensidade de corrente  $I$  e a resistência térmica  $R_{th}$  à resistência eléctrica  $R_e$ . O solo é idealizado como um elemento unitário de forma cúbica, que no seu interior contém água, ar e partículas sólidas. Cada uma das partículas assume geometria esférica, dispondo-se segundo camadas. Quanto ao tipo de contactos entre esferas, Usowicz (2013), refere que segundo a direcção vertical são assumidas ligações em paralelo, por outro lado esferas vizinhas lateralmente, segundo uma direcção horizontal apresentam conexões em série (Figura 5.2).

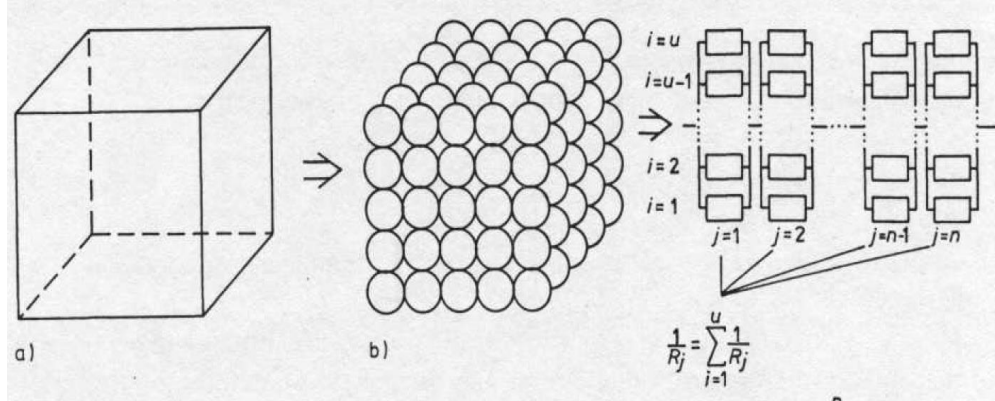


Figura 5.2 Esquematização do elemento cubico de solo, a) volume unitário de solo, b) sistema de esferas dispostas segundo camadas, horizontais, c) ligações em paralelo segundo a direcção horizontal e em série segundo a direcção vertical (Usowicz, 1992)

Considere-se então, que num dado nível do modelo perpendicular ao vector fluxo de calor, ilustrado na Figura 5.2 b), existem  $u$  ligações em paralelo e  $n$  ligações em série entre níveis.

A condutividade térmica média do solo, estimada tendo por base o conceito de resistividade térmica e o modelo ilustrado na Figura 5.2, é dada pela equação (5.28).

$$\lambda_{méd} = \frac{4 \cdot \pi}{u \cdot \bar{m}} \quad (5.28)$$

em que  $\bar{m}$ , calculado através da equação (5.29), é uma variável definida em função da porosidade  $n$ , do teor em água  $\omega$ , da temperatura  $T$ , do raio das partículas  $r$  e de  $u$ .

$$\bar{m} = \sum_{j=1}^K a_j \cdot P(a = a_j) \quad (5.29)$$

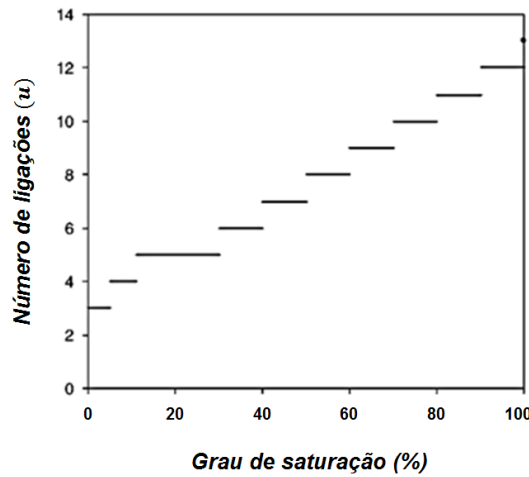
onde  $a_j$ , dado pela equação (5.30), é dependente da condutividade térmica ( $\lambda_{ij}$ ) dos diferentes materiais constituintes do solo, do raio das partículas ( $r_{ij}$ ) e finalmente da percentagem de cada um dos constituintes num volume unitário de solo ( $x_{ij}$ ).

$$a_j = \frac{1}{\sum_{i=1}^u \lambda_{ij} \cdot r_{ij} \cdot x_{ij}} \quad (5.30)$$

$P(a = a_j)$  define a probabilidade de ocorrência de um determinado arranjo  $a_j$ . Tal probabilidade é dada pela equação (5.31).

$$P(x_{1\alpha}, x_{2\beta}, \dots, x_{k\omega}) = \frac{u!}{x_{1\alpha}! \cdot x_{2\beta}! \cdot \dots \cdot x_{k\omega}!} \cdot f_1^{x_{1\alpha}} \cdot f_2^{x_{2\beta}} \cdot \dots \cdot f_k^{x_{k\omega}} \quad (5.31)$$

em que  $f_k$  é a percentagem de uma dada fracção num volume unitário de solo e  $x_{k\omega}$  denota o número de partículas dessa mesma fracção existentes numa determinada configuração. O valor de  $u$  concretiza, como já referido, o número de ligações em paralelo. O seu valor pode ser obtido graficamente como função do grau de saturação  $S_r$  (Figura 5.3)



**Figura 5.3** Número de ligações em paralelo como função do grau de saturação  $S_r$ , adaptado de Usowicz et al. (2006)

Na bibliografia consultada, o modelo é aplicado sem que exista diferenciação completa dos constituintes da fracção sólida. Em Usowicz (1992) e Usowicz et al. (2006), são considerados três grandes grupos de constituintes sólidos: o quartzo, outros minerais e a matéria orgânica. No segundo grupo os autores consideram um valor médio de condutividade térmica entre os minerais que dele fazem parte. A diferenciação do quartzo dos restantes minerais constituintes da fracção sólida resulta da diferença substancial entre as suas condutividades térmicas. Pelo mesmo motivo, existe diferenciação da matéria orgânica, cuja condutividade térmica apresenta valores muito diferentes dos exibidos pela maioria dos minerais constituintes do solo. Assim a consideração dos referidos grupos, torna-se suficiente para garantir que a estimacção obtida é similar ao valor determinado experimentalmente.

#### 5.2.1.6 Método de Côté e Konrad (2005)

O método de Côté e Konrad (2005) constitui um modelo generalizado para determinação da condutividade térmica dos solos, que tem por base o conceito de condutividade térmica normalizada desenvolvido por Johansen em 1975, e já apresentado neste trabalho. Os autores desenvolveram uma metodologia que possibilita a determinação do valor de condutividade considerando de forma consistente diversas propriedades dos solos, designadamente a porosidade, o grau de saturação, a composição mineralógica, a granulometria e a forma das partículas sólidas do solo.

O modelo propõe então o cálculo do valor de condutividade através da equação (5.32).

$$\lambda_{est} = (\lambda_{sat} - \lambda_d) \cdot K_e + \lambda_d \quad (5.32)$$

em que  $K_e$  é condutividade térmica normalizada, definida por Côté e Konrad (2005) como:

$$K_e = \frac{\kappa \cdot S_r}{1 + (\kappa - 1) \cdot S_r} \quad (5.33)$$

onde  $\kappa$  é um parâmetro empírico definido em função do tipo de solo, apresentando-se os seus valores na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 Valores de  $\kappa$  para os diferentes tipos de solo adaptado de Côté e Konrad (2005)**

Tipo de Solo	$\kappa$
Seixos e Areias	4,60
Areais médias a finas	3,55
Solos siltsos e argilosos	1,90
Solos orgânicos	0,60

Os valores de condutividade térmica seca e saturada podem ser obtidos através das expressões enunciadas nas equações (5.34) e (5.35).

$$\lambda_d = \chi \cdot 10^{\eta n} \quad (5.34)$$

$$\lambda_{sat} = \lambda_s^{1-n} \cdot 0,6^n \quad (5.35)$$

em que  $\chi$  e  $\eta$  são factores dependentes da forma das partículas sólidas, apresentando-se os seus valores na Tabela 5.3. A condutividade térmica da fracção sólida,  $\lambda_s$ , pode ser definida com base em valores existentes na bibliografia ou tendo em consideração a equação (5.8).

**Tabela 5.3 Valores de  $\chi$  e  $\eta$  para os diferentes tipos de solos adaptado de Côté e Konrad (2005)**

Tipo de solo	$\chi$ (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	$\eta$
Cascalho e rocha britada	1,70	1,80
Solos naturais (minerais)	0,75	1,20
Solos orgânicos	0,30	0,87

### 5.2.1.7 Método de Lu et al. (2007)

Uma metodologia mais recente para o cálculo da condutividade térmica foi desenvolvida por Lu *et. al.* em 2007. Esta toma em consideração uma relação do tipo exponencial entre o grau de saturação e a

condutividade térmica normalizada (Kodikara *et al.*, 2011). Tal relação é expressa como enunciado na equação (5.36).

$$K_e = e^{\alpha_1[1-Sr^{(\alpha_1-\beta_1)}]} \quad (5.36)$$

sendo  $\alpha_1$  e  $\beta$  parâmetros empíricos, dependentes da textura e forma das partículas do solo, respectivamente. Os seus valores podem variar em função dos autores considerados. Para Kodikara *et al.* (2011) os valores a utilizar são os inicialmente propostos por Lu *et al.* (2007). Mais recentemente Tarnawski e Leong (2012) sugeriram valores diferentes obtidos por retroanálise. Estes encontram-se expostos na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4** Valores dos parâmetros  $\alpha_1$  e  $\beta$  para os diferentes tipos de solos, adaptado de Kodikara *et al.* (2011)

Tipo de Solo	$\alpha_1$		$\beta$	
	Lu <i>et al.</i>	Tarnawski <i>et al.</i>	Lu <i>et al.</i>	Tarnawski <i>et al.</i>
Granular	0,96	0,728	1,33	1,165
Fino	0,27	0,370		1,29

A condutividade térmica do solo é dada pela equação (5.37) resultado da combinação entre as equações (5.16) e (5.36).

$$\lambda_{est} = \left[ e^{\alpha_1(1-Sr^{(\alpha_1-\beta_1)})} \cdot (\lambda_{sat} - \lambda_d) \right] - \lambda_d \quad (5.37)$$

Para determinação do valor de condutividade térmica no estado seco, os autores propõem, segundo Tarnawski e Leong (2012), uma expressão dependente do valor de porosidade tal como se apresenta na equação (5.38).

$$\lambda_d = -0,56 \cdot n + 0,51 \quad (5.38)$$

Já a condutividade térmica saturada do solo, é obtida com recurso à equação (5.18).

#### 5.2.1.8 Método de Gori e Corasaniti (2013)

O modelo proposto por Gori e Corasaniti (2013) permite a determinação do valor de condutividade térmica sem que exista a necessidade de introdução de variáveis de carácter empírico.

No que se refere à qualidade da estimação, os autores, realizaram uma avaliação comparativa entre os resultados experimentais obtidos em ensaios realizados sobre amostras de solo com 40% de porosidade e  $\lambda=2,57 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  e os resultados obtidos com base no método. Para valores de saturação baixos, a metodologia de estimação fornece valores ligeiramente inferiores aos obtidos com base em métodos experimentais. Para valores intermédios de  $S_r$ , verificou-se o contrário, os valores de cálculo por estimação são superiores aos obtidos através de ensaios experimentais.

Contudo e para valores de  $S_r$  elevados, os autores obtiveram uma boa concordância entre os valores estimados e os valores medidos experimentalmente

O referido modelo assume *à priori* que o solo é um meio trifásico constituído por água, ar e partículas sólidas. A fase sólida é constituída por partículas de geometria *quáasi*-esférica dispersas na matriz constituída por ar e água. Os autores elaboraram o modelo assumindo um elemento de solo de forma cúbica com lado  $2l$ . No interior deste, encontram-se uma partícula sólida esférica de raio  $R_1$ , com  $R_1 > l$  e um determinado volume de água também esférico com  $R_2 > l$ , disposto em torno da partícula sólida. Por fim, a fracção constituída por ar ocupa o volume restante, correspondente aos cantos do cubo. O resultado é um elemento de solo tal como se apresenta na Figura 5.4 e 5.5.

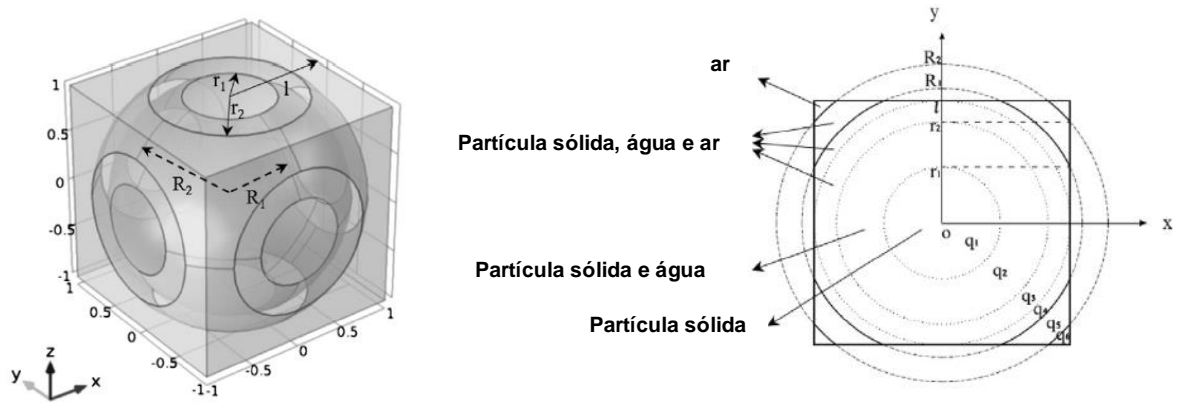


Figura 5.4 (A) Elemento de solo e (B) Elemento de solo visto segundo o plano  $xy$ , adaptado de Gori e Corasaniti (2013)

A porosidade do solo deve estar compreendida no intervalo  $0,0349 \leq n \leq 0,4764$ , não sendo o modelo aplicável a solos cujos valores estejam fora desse intervalo. O valor de porosidade e grau de saturação são dados pelas equações (5.39) e (5.40).

$$n = \frac{(8 + 2\pi) \cdot \left(\frac{l}{R_1}\right)^3 - 6\pi \cdot \frac{l}{R_1} + \frac{8}{3} \cdot \pi}{\left(\frac{2 \cdot l}{R_1}\right)^3} \quad (5.39)$$

$$S_r = \frac{8\pi \cdot \left[1 - \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^3\right] + 18\pi \cdot \frac{l}{R_1} \cdot \left[\left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 - 1\right]}{3 \cdot (8 + 2n) \cdot \left(\frac{l}{R_1}\right)^3 - 18\pi \cdot \frac{l}{R_1} + 8\pi} \quad (5.40)$$

com  $\frac{l}{R_1}$  dado pela equação (5.41).

$$\frac{l}{R_1} = -2 \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4 + \pi - 4 \cdot n}} \cdot \cos \left[ \frac{1}{3} \cdot \arccos \left( \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{4 + \pi - 4 \cdot n}{\pi}} + \frac{2}{3} \cdot \pi \right) \right] \quad (5.41)$$

Para determinação da condutividade térmica o modelo de Gori e Corasaniti assume um regime estacionário e unidireccional de condução de calor, existindo apenas variação de temperatura segundo a direcção do eixo  $z$ . O fluxo total de calor  $q_{total}$  que atravessa o elemento de solo é dado

pela equação (5.42). Este fluxo é dado pela soma dos fluxos parciais  $\dot{q}_1$ ,  $\dot{q}_2$ ,  $\dot{q}_3$ ,  $\dot{q}_4$ ,  $\dot{q}_5$  e  $\dot{q}_6$ , que se estabelecem no elemento de solo tal como se apresenta na Figura 5.5

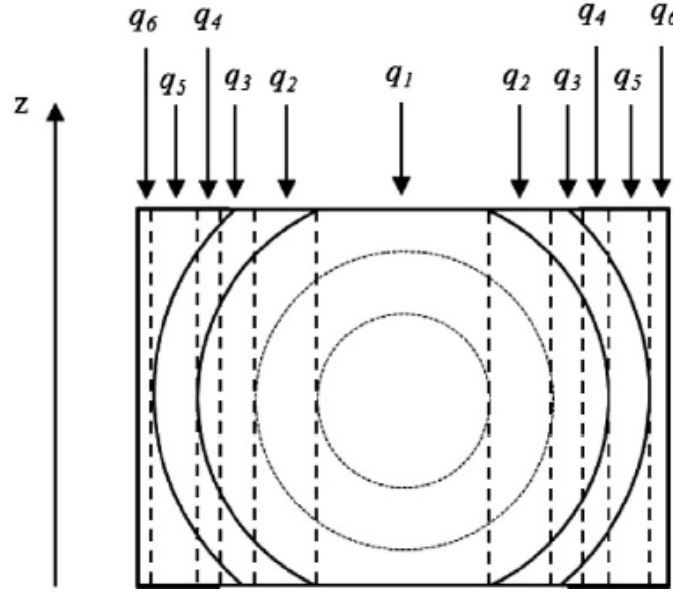


Figura 5.5 Secção diagonal do elemento de solo (Gori e Corasaniti, 2013)

$$\dot{q}_{total} = \lambda \cdot 4 \cdot l^2 \cdot \frac{\Delta T}{2 \cdot l} = \dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4 + \dot{q}_5 + \dot{q}_6 \quad (5.42)$$

Reescrevendo a equação (5.42) em ordem à condutividade térmica obtém-se uma expressão para o cálculo desta propriedade.

$$\lambda = \frac{\dot{q}_1 + \dot{q}_2 + \dot{q}_3 + \dot{q}_4 + \dot{q}_5 + \dot{q}_6}{2 \cdot l \cdot \Delta T} \quad (5.43)$$

O fluxo de calor  $\dot{q}_1$ , que se propaga unicamente através da fracção sólida atravessando uma secção de área  $S_1$ , é dado dada pela equação (5.45).

$$S_1 = \pi \cdot r_1^2 \quad (5.44)$$

$$\dot{q}_1 = \lambda_s \cdot \pi \cdot r_1^2 \cdot \frac{\Delta T}{2 \cdot l} \text{ com } r_1 = \sqrt{R_1^2 - l^2} \quad (5.45)$$

O cálculo do fluxo  $\dot{q}_2$ , dado pela equação (5.47), atravessa a fase líquida e sólida segundo uma secção de área  $S_2$ , calculada pela equação (5.46).

$$S_2 = \pi \cdot (r_2^2 - r_1^2) \quad (5.46)$$

$$\dot{q}_2 = R_1 \cdot \int_{\frac{r_1}{R_1}}^{\frac{r_2}{R_1}} \frac{\lambda_s \cdot \lambda_w \cdot \pi \cdot \frac{y}{R_1}}{\lambda_w \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{y}{R_1}\right)^2} + \lambda_s \cdot \left(\frac{l}{R_1} - \sqrt{1 - \left(\frac{y}{R_1}\right)^2}\right)} \cdot \Delta T \cdot d\left(\frac{y}{R_1}\right) \quad (5.47)$$

O fluxo de calor  $\dot{q}_3$ , que atravessa a secção  $S_3$  perpendicular à direcção de fluxo é dado pela equação (5.49).

$$S_3 = \pi \cdot (l^2 - r_2^2) \quad (5.48)$$

$$\dot{q}_3 = R_1 \cdot \int_{\frac{r_2}{R_1}}^{\frac{l}{R_1}} \frac{\lambda_s \cdot \lambda_w \cdot \lambda_a \cdot \pi \cdot \frac{y}{R_1}}{\lambda_s \cdot \lambda_w \cdot \left( \frac{l}{R_1} - \sqrt{\left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2} \right) + \lambda_s \cdot \lambda_a \cdot \left( \sqrt{1 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2} - \sqrt{\left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2} \right) + \lambda_w \cdot \lambda_a \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2}} \cdot \Delta T d\left(\frac{y}{R_1}\right) \quad (5.49)$$

O fluxo de calor  $\dot{q}_4$  propaga-se através de uma secção de área  $S_4$  (equação (5.50)), atravessando ar, água e partícula sólida, sendo o seu valor dado pela equação (5.51)

$$S_4 = \pi \cdot (R_1^2 - l^2) - 4 \cdot \left[ R_1^2 \cdot \arccos \left( \frac{l}{R_1} - r_1 \cdot l \right) \right] \quad (5.50)$$

$$\dot{q}_4 = R_1 \cdot \int_{\frac{r_2}{R_1}}^1 \frac{\lambda_s \cdot \lambda_w \cdot \lambda_a \cdot \left( \pi - 4 \cdot \arccos \left( \frac{l}{R_1} \right) \right) \cdot \frac{y}{R_1}}{\lambda_s \cdot \lambda_w \cdot \left( \frac{l}{R_1} - \sqrt{\left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2} \right) + \lambda_s \cdot \lambda_a \cdot \left( \sqrt{1 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2} - \sqrt{\left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2} \right) + \lambda_w \cdot \lambda_a \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2}} \cdot \Delta T d\left(\frac{y}{R_1}\right) \quad (5.51)$$

A fracção de fluxo de calor denominada de  $\dot{q}_5$  propaga-se através de uma secção de área  $S_5$  determinada pela equação (5.52), sendo o seu valor dado pela expressão apresentada na equação (5.53).

$$S_5 = \pi \cdot (R_2^2 - R_1^2) - 4 \cdot \left[ \left( R_2^2 \cdot \arccos \frac{l}{R_2} - r_2 \cdot l \right) - \left( R_1^2 \cdot \arccos \frac{l}{R_1} - r_1 \cdot l \right) \right] \quad (5.52)$$

$$\dot{q}_5 = R_1 \cdot \int_{\frac{r_2}{R_1}}^1 \frac{\lambda_w \cdot \lambda_a \cdot \left( \pi - 4 \cdot \arccos \left( \frac{l}{R_1} \right) \right) \cdot \frac{y}{R_1}}{\lambda_w \cdot \left( \frac{l}{R_1} - \sqrt{\left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2} \right) + \lambda_a \cdot \left( \sqrt{\left( \frac{R_2}{R_1} \right)^2 - \left( \frac{y}{R_1} \right)^2} \right)} \cdot \Delta T \cdot d\left(\frac{y}{R_1}\right) \quad (5.53)$$

Por fim a última parcela de fluxo denominada de  $\dot{q}_6$ , determinado através da equação (5.55), atravessa apenas ar, sendo a área secção perpendicular à direcção de fluxo  $S_6$  dada pela equação (5.54).

$$S_6 = 4 \cdot l^2 \cdot \left[ \pi \cdot R_2^2 - 4 \cdot R_2^2 \cdot \arccos \left( \frac{l}{R_2} \right) - 4 \cdot r_2 \cdot l \right] \quad (5.54)$$

$$\dot{q}_6 = \frac{\lambda_a}{2 \cdot l} \cdot \Delta T \cdot \left[ 4 \cdot l^2 - \pi \cdot R_2^2 - R_2^2 \cdot \arccos \left( \frac{l}{R_2} \right) - r_2 \cdot l \right] \quad (5.55)$$

### 5.3. Ensaio de laboratório para determinação da condutividade térmica

As técnicas de laboratório para determinação da condutividade térmica podem ser classificadas em duas grandes categorias: os métodos em regime estacionário e os métodos em regime variável (Moel *et al.*, 2010). Em alguns casos, para além da determinação da condutividade térmica, é ainda

possível obter o valor de calor específico. Conhecendo as duas propriedades referidas, é viável determinar analiticamente a difusividade térmica recorrendo à equação (4.12).

### 5.3.1. Regime estacionário

Os métodos em regime estacionário medem a condutividade térmica quando a temperatura do provete de solo, sujeito a um gradiente de temperatura, é constante ao longo do tempo e em qualquer ponto e o fluxo de calor através do provete alcança um nível constante e estacionário (Moel *et al.*, 2010).

Ensaio de determinação de propriedades térmicas em regime estacionário:

- Placa quente protegida (*Guarded hot plate*);
- Aparelho fluximétrico de calor (*Heat flow meter apparatus*);
- *Guarded-comparative-longitudinal heat flow technique*.

#### 5.3.1.1 Placa quente protegida

Segundo a ASTM C177-10 (2010), o ensaio com *Guarded Hot Plate* (GHP) ou Placa Quente Protegida, permite a medição do fluxo térmico em regime permanente entre dois materiais de isolamento. A aplicabilidade deste método para a realização da caracterização térmica de solos não é consensual. Diversos autores como Jowkar *et al.* (2013), Moel *et al.* (2010), Nikolaev (2007) e Nikolaev *et al.* (2013) utilizaram-no para caracterizar termicamente o solo. Outros autores, como Nicholson *et al.* (2008), consideram a GHP inadequada para a obtenção da condutividade térmica deste tipo de materiais. No essencial, a impossibilidade de aplicação deve-se à necessidade de provetes de grandes dimensões e a problemas relacionados com a migração da fase líquida.

As GHP são geralmente constituídas por uma unidade de medição, onde está incluída a unidade de aquecimento, duas placas de arrefecimento e protecções que possibilitam a obtenção do fluxo de calor unidireccional. As protecções são consideradas como primária e secundária. A primeira é sempre parte integrante do dispositivo, estando colocada em redor da unidade de medição, separada desta por um espaço preenchido por ar. Já a protecção secundária nem sempre é necessária, segundo a ASTM C177-10 (2010), esta é apenas utilizada para ensaios realizados a temperaturas que excedam em 10°C a temperatura ambiente.

Por este ser um método em regime permanente é necessário que não exista variação do gradiente de temperatura estabelecido entre a unidade de aquecimento e de arrefecimento (placa isotérmica fria). Estes dois elementos do dispositivo devem durante todo o período de ensaio ser mantidos a temperatura constante, ou seja, devem constituir fronteiras isotérmicas. Desta forma, é evidente a necessidade de monitorização da temperatura de ambas as placas durante a realização do ensaio de forma a garantir que não sofrem variações significativas de temperatura. Tais oscilações implicam alteração no gradiente de temperatura, daí resultando um fluxo de calor variável que inviabiliza a consideração de condições de transferência de calor em regime estacionário. As variações admitidas estão referidas nas normas ASTM C517 (2010) e NP EN 12667 (2012). Além da monitorização da



temperatura da unidade de aquecimento e arrefecimento, existem ainda pontos de medição de temperatura ao longo do provete a ensaiar. As medições são aí realizadas utilizando termopares, dispositivos estes seleccionados de acordo com o tipo de material a caracterizar.

O fluxo de calor ( $\dot{q}$ ) gerado pela unidade de aquecimento é conhecido através da potência por ela dissipada, obtida pela Lei de Joule, e pela área da secção perpendicular à direcção de fluxo. A utilização de uma GHP permite a obtenção de valores de condutividade térmica absolutos e por isso os seus resultados são consideravelmente melhores que os obtidos através de outro tipo de dispositivos. É através deste método que são determinadas algumas das condutividades térmicas de referência utilizadas noutros ensaios, cujos resultados são conseguidos através de comparação com amostras com condutividade conhecida (amostras de referência).

A configuração do aparelho pode variar, existindo nas normas europeia e ASTM duas configurações possíveis, a simples e a dupla. A primeira utiliza um provete de ensaio e uma unidade de aquecimento, a segunda dois provetes de ensaio idênticos e uma unidade de aquecimento central.

Na configuração dupla é colocado um provete abaixo da placa central e um acima da mesma tal como se ilustra na Figura 5.6. O fluxo de calor entre as duas placas é simétrico (fluxo ascendente e descendente), bem como a absorção total da energia calorífica produzida pela fonte de calor. A configuração simples utiliza apenas uma placa quente e outra fria. Entre estas, é introduzido o provete de solo.

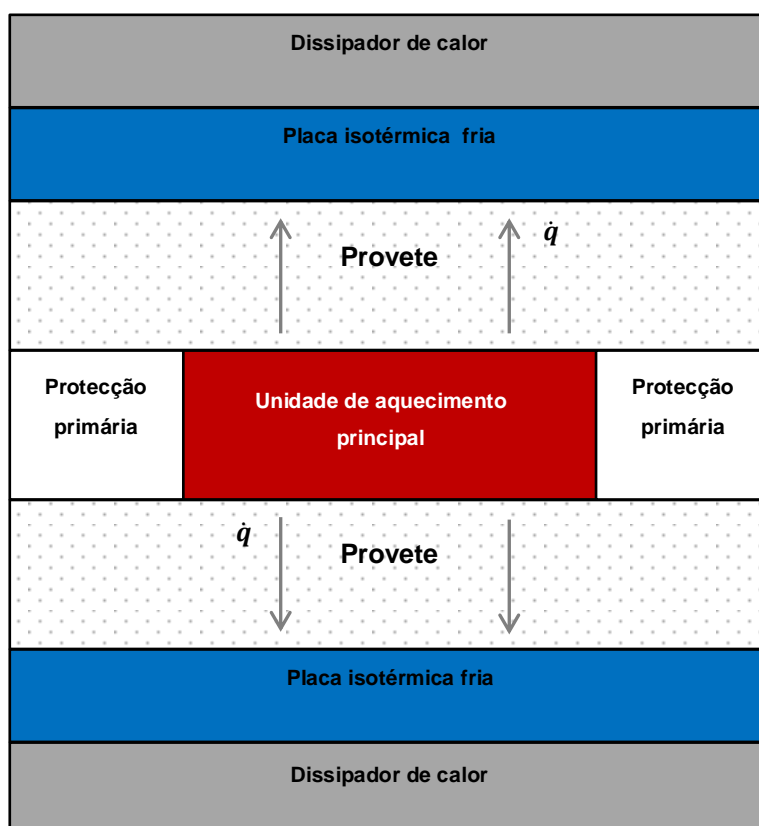


Figura 5.6 - Esquema de dispositivo GHP modelo Dynatech TCFG-R4-6, adaptado de Al-Hadhrami e Ahmad (2009)

Segundo a normalização europeia e ASTM, os ensaios realizados nestes dispositivos encontram-se limitados tanto por condicionantes directamente relacionadas com o dispositivo, como com a amostra nele ensaiada. No que se refere ao dispositivo de ensaio, as limitações prendem-se, no essencial, com a capacidade de o aparelho manter um fluxo de calor constante, unidireccional e uniforme e pela capacidade que este apresenta para a aquisição de dados, nomeadamente para obter valores de temperatura e potência dissipada. No que é relacionado com o provete, pode apresentar problemas quando os materiais nele ensaiados apresentem importantes heterogeneidades e comportamento anisotrópico no que se refere à transferência de calor. Para o sucesso do ensaio é necessário que os provetes apresentem superfícies planas para que exista bom contacto entre estes e as placas quente e fria. No caso dos materiais granulares, como os solos, devem ser prevenidos problemas relacionados com o adequado contacto entre o solo e as superfícies planas do dispositivo. Nos dispositivos duplos é essencial que os dois provetes apresentem elevado grau de semelhança.

A metodologia de determinação das grandezas térmicas tendo por base a GHP, apresenta-se em seguida, segundo a norma europeia NP EN 12667 (2012). É semelhante para ambas as configurações, porém é necessário considerar um pequeno ajuste na área da unidade de aquecimento.

Com base nos dados recolhidos durante o ensaio é possível através de algumas expressões matemáticas, obter as grandezas térmicas dos materiais em estudo. Desta forma para o GHP, a resistividade térmica  $R_{th}$ , em  $(m^2 \cdot K \cdot W^{-1})$  é dada por:

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{P} \cdot A \quad (5.56)$$

em que  $T_1$  e  $T_2$  são as temperaturas médias da placa quente e placa fria expressa em graus Kelvin (K),  $A$  é a área da unidade de aquecimento em  $m^2$  (para dispositivos com duas amostras deve ser multiplicada por dois) e  $P$  é a potência dissipada pela fonte de calor. A última ( $P$ ), pode ser determinada em função da diferença de potencial  $U$ , medida nas extremidades da unidade de aquecimento, e da intensidade de corrente  $I$ , através da equação (5.57).

$$P = \dot{Q} = I \cdot U \quad (5.57)$$

A condutividade térmica  $\lambda$  pode ser obtida recorrendo à multiplicação do inverso da resistência pela espessura média do provete  $d$ , logo:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{(T_1 - T_2) \cdot A} \cdot d = \frac{1}{R_{th}} \cdot d \quad (5.58)$$

### 5.3.1.2 Heat Flow Meter Apparatus

O *Heat Flow Meter Apparatus* (HFMA), em português aparelho fluximétrico de calor, constitui também um dispositivo para determinação da condutividade térmica de diversos materiais, através da imposição de um fluxo de calor estacionário. É utilizado com grande frequência em diversos materiais

por se basear num conceito relativamente simples, ser rápido e com um largo espectro de aplicação (ASTM C518-10, 2010). Nos casos dos solos, Clarke *et al.* (2008) e Moel *et al.* (2010) referem este método como uma das soluções para a determinação da condutividade térmica.

A metodologia de ensaio na qual é empregado o HFMA, classifica-se segundo a referida organização como secundária ou comparativa, pelo facto de as propriedades térmicas do material em análise serem obtidas, após a calibração do aparelho com recurso a amostras de referência. Estas devem ser previamente caracterizadas em aparelhos de medição absoluta, de que é exemplo a GHP. O ensaio tem como pressuposto base um fluxo térmico unidireccional, com perdas de energia térmica desprezáveis. Tendo em vista a redução das referidas perdas, os provetes devem apresentar espessuras muito reduzidas comparativamente às secções transversais que devem ser de grandes dimensões. O HFMA é utilizado considerando apenas transmissão de calor por condução, descartando os mecanismos de transferência por convecção e radiação. Não obstante o referido anteriormente, os resultados obtidos são bastante fidedignos.

O fluxímetro de calor inclui uma unidade de aquecimento e outra de arrefecimento, fluxómetros de calor, termopares e medidores de diferença de temperatura. Em alguns casos, recorre-se ainda a equipamentos que tem por finalidade o controlo da temperatura ambiente de ensaio. Diferem das GHP pelo facto de utilizarem fluxímetros de calor.

A configuração dos dispositivos inclui um núcleo homogéneo, onde são colocados detectores de diferença de temperatura superficial, um ou vários detectores de temperatura e um ou dois fluxímetros de calor. A forma de disposição dos componentes do HFMA pode variar. Segundo as normas europeia NP EN 12667 (2012) e americana ASTM C518-10 (2010) existem três configurações possíveis para execução de ensaios com o fluxímetro de calor (Figura 5.7):

- Assimétrica com um provete;
- Simétrica com um provete;
- Simétrica com dois provetes;

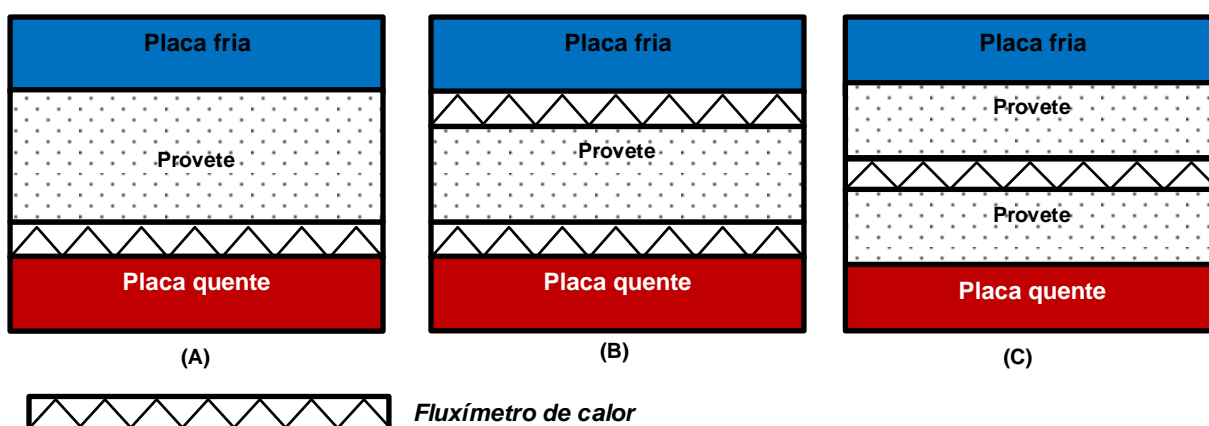


Figura 5.7 Esquema da configuração do HFMA: (A) configuração assimétrica com um provete, (B) configuração simétrica e (C) configuração simétrica com dois provetes, adaptado de ASTM C518-10 (2010)

Na configuração assimétrica com um provete (Figura 5.7 (A)), o fluxímetro de calor pode ser colocado face a qualquer uma das placas isotérmicas. A execução do ensaio com simetria e uma amostra (Figura 5.7 (B)) recorre à introdução de dois fluxímetros de calor colocados em cada uma das faces do provete. Segundo a norma ASTM C518-10 (2010), esta configuração é a menos sensível às condições de fronteira. Por fim, a configuração simétrica com dois provetes, utiliza apenas um fluxímetro (Figura 5.7 (C)) colocado entre os dois provetes a ensaiar. Ao contrário da configuração anterior, neste caso, existe grande sensibilidade às condições de fronteira e perdas de calor.

O procedimento experimental inicia-se com a calibração dos fluxímetros. Após esta, são colocados na face ou faces do provete em ensaio, nunca sendo ultrapassadas as temperaturas do seu espectro de calibração. Em seguida, o solo é colocado no interior do dispositivo entre as placas quente e fria. Estas, por apresentarem diferentes temperaturas impõem ao provete de solo um gradiente térmico, que a dado instante atingirá um valor constante. O fluxo é então medido através dos fluxímetros previamente inseridos conforme a configuração utilizada. A condutividade e a resistência térmica do solo são obtidas através da aplicação da Lei de Fourier.

A resistência térmica  $R_{th}$  do solo em ensaio num dispositivo com uma amostra e um fluxímetro de calor, é dada pela equação (5.59).

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{f \cdot e_h} \quad (5.59)$$

em que  $T_1$  é a temperatura média do lado quente,  $T_2$  é a temperatura média do lado frio,  $f$  é o factor de calibração do fluxímetro de calor e  $e_h$  é tensão de saída do fluxímetro (força electromotriz). A condutividade térmica  $\lambda$  é determinada através do inverso da resistência térmica multiplicado pela espessura do provete (equação (5.60)).

$$\lambda = \frac{f \cdot e_h \cdot d}{T_1 - T_2} \quad (5.60)$$

No caso de dispositivos com um provete e dois fluxímetros (configuração simétrica), as grandezas acima indicadas podem ser obtidas reescrevendo as equações (5.59) e (5.60), resultando as equação (5.61) e (5.62).

$$R_{th} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{1}{2} \cdot (f_1 \cdot e_{h1} + f_2 \cdot e_{h2})} = \frac{2 \cdot (T_1 - T_2)}{(f_1 \cdot e_{h1} + f_2 \cdot e_{h2})} \quad (5.61)$$

$$\lambda = \frac{\frac{1}{2} \cdot (f_1 \cdot e_{h1} + f_2 \cdot e_{h2}) \cdot d}{T_1 - T_2} = \frac{(f_1 \cdot e_{h1} + f_2 \cdot e_{h2}) \cdot d}{(T_1 - T_2) \cdot 2} \quad (5.62)$$

onde  $e_{h1}$  e  $e_{h2}$  são as tensões de saída dos fluxímetros um e dois respectivamente e  $f_1$  e  $f_2$  são os seus factores de calibração.

Por fim, na configuração simétrica com dois provetes a resistência térmica total  $R_{th,total}$  é dada segundo a equação (5.63)

$$R_{th,total} = \frac{(T'_1 - T'_2) + (T''_2 - T''_1)}{f \cdot e_h} \quad (5.63)$$

Para esta configuração, a condutividade térmica média pode ser obtida pela equação (5.64).

$$\lambda_m = \left( \frac{f \cdot e_h}{2} \right) \cdot \left( \frac{d'}{T'_1 - T'_2} + \frac{d''}{T''_1 - T''_2} \right) \quad (5.64)$$

Onde  $d'$  e  $d''$  são as espessuras de cada um dos provetes,  $T'_1$  e  $T'_2$  e  $T''_1$  e  $T''_2$  são as temperaturas do lado quente e do lado frio, respectivamente.

### 5.3.1.3 Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique

Com recurso ao *Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique* (GCLHFT) é possível determinar o valor de condutividade térmica de diversos materiais, para os quais a condutividade térmica se situa entre  $0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  e  $200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , para temperaturas de ensaio entre 90K e 1300K ( $-183^\circ\text{C}$  e  $1027^\circ\text{C}$ ) (ASTM E1225-09, 2009). A sua aplicabilidade a solos é referida por autores como Gunn *et al.* (2005), Moel *et al.* (2010) e Singh e Bouazza (2010)

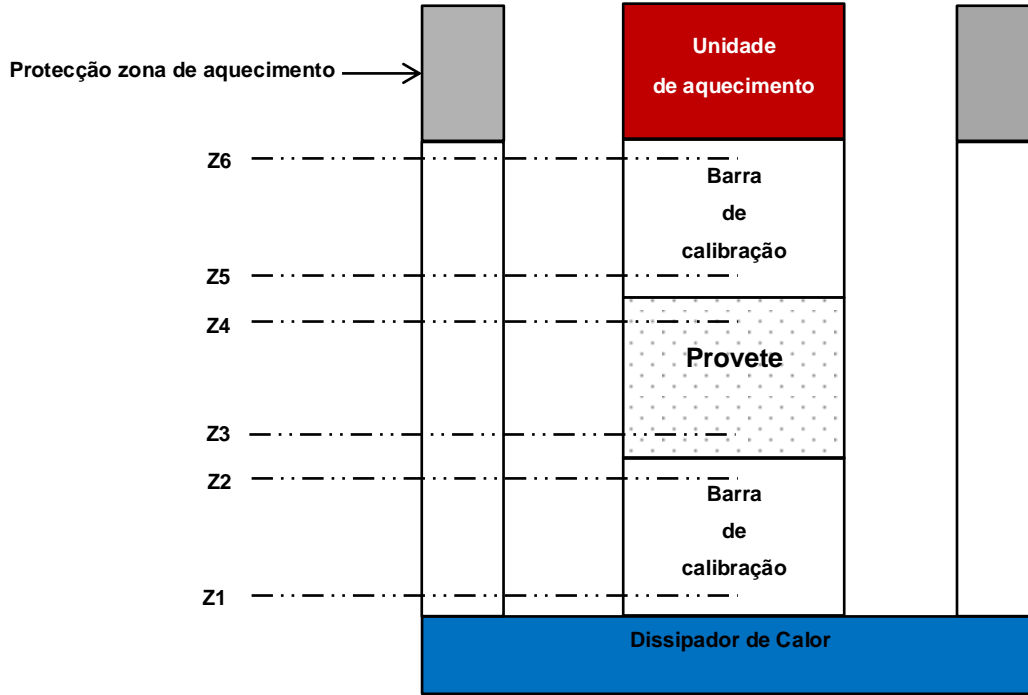
Mais uma vez, são utilizadas amostras de referência através das quais é possível obter as propriedades térmicas dos materiais em estudo. A utilização do GCLHFT requer o conhecimento prévio da condutância térmica, obtida com base no quociente entre um valor típico de condutividade térmica e a espessura do provete a ensaiar ( $d$ ). É assim necessário considerar inicialmente um valor de condutividade do solo ( $\lambda_s$ ) que pode ser arbitrado utilizando valores existentes na bibliografia ou com base em fórmulas empíricas, como as apresentadas anteriormente.

$$h_c = \frac{\lambda_s}{d} \quad (5.65)$$

O dispositivo é constituído por uma torre onde se dispõem as amostras de referência, também conhecidas como barras de calibração, as unidades de aquecimento e arrefecimento (dissipador de calor), o provete, uma protecção periférica e no mínimo dois termopares em cada barra de calibração e no provete. Estes devem ser colocados nas posições indicadas na Figura 5.8, denotadas pela letra Z.

O provete a ensaiar é colocado entre as barras de calibração. Sobre a barra de calibração superior é instalada a unidade de aquecimento e sob a barra de calibração inferior é disposta a unidade de arrefecimento. No espaço existente entre a guarda periférica e a torre de ensaio é colocado um material de isolamento necessário para garantir um fluxo de calor homogéneo e unidireccional. A guarda periférica é sujeita a um gradiente térmico similar ao imposto na torre de ensaio.

Após ser atingido o regime estacionário em todo o sistema é possível determinar a condutividade térmica do material que constitui o provete. O valor é obtido através dos gradientes de temperatura medidos e da condutividade térmica do material que constitui as barras de calibração.



Z denota a posição dos termopares 1, 2, 3, 4, 5 e 6.

Figura 5.8 Esquema em corte de um dispositivo GCLHFT, adaptado de ASTM E1225-09 (2009)

A aplicação deste método não é restrita a uma determinada forma de provete, sendo contudo as secções quadradas e circulares as mais utilizadas. É apenas necessário que a zona de condução de calor seja idêntica no provete e nas placas de referência. Segundo a ASTM E1225-09 (2009), podem existir variações até 1% entre a área de secção do provete e da barra de medição. No caso de provetes de secção cilíndrica o raio do provete e das zonas de medição deverá ser coincidente, podendo variar até 1%. O raio do provete,  $r_p$ , deverá ser tal que o valor do quociente entre o raio da zona de isolamento,  $r_b$ , e o seu valor se situe entre 2,0 e 3,5:

$$2,0 \leq \frac{r_b}{r_p} \leq 3,5$$

Com base nas medições de temperatura realizadas pelos termopares, é possível obter o fluxo térmico aparente que passa através de uma determinada secção. Assim, recorrendo às equações (5.66) e (5.67), sugeridas na norma ASTM E1225-09, é possível calcular o fluxo térmico aparente que é transmitido através das barras de calibração do topo e base da torre de ensaio.

$$\dot{q}_{topo} = \lambda_{cal} \cdot \frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} \quad (5.66)$$

$$\dot{q}_{base} = \lambda_{cal} \cdot \frac{T_6 - T_5}{Z_6 - Z_5} \quad (5.67)$$

em que  $\dot{q}_{topo}$  e  $\dot{q}_{base}$  são os fluxos de calor na barra de medição do topo e base do dispositivo respectivamente,  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_5$  e  $T_6$  são as temperaturas medidas pelos termopares nas posições,  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_5$  e  $Z_6$ , indicadas na e  $\lambda_{cal}$  é a condutividade do material que constitui as barras de calibração.

Os valores resultantes da aplicação destas fórmulas não deverão variar entre si mais que 10%. Ou seja, não deverão ser verificadas perdas de fluxo de calor superiores a 10% no percurso realizado pela energia em cada uma das barras de medição.

A condutividade térmica da amostra pode ser obtida segundo a ASTM E1225-09 (2009) e Gunn *et al.* (2005), pela seguinte equação:

$$\lambda = \frac{\lambda_{cal} \cdot Z_4 - Z_3}{2 \cdot (T_4 - T_3)} \cdot \left[ \frac{T_2 - T_1}{Z_2 - Z_1} + \frac{T_6 - T_5}{Z_6 - Z_5} \right] \quad (5.68)$$

O valor de condutividade térmica do material de calibração,  $\lambda_{cal}$ , pode ser seleccionado através do gráfico ilustrado na Figura 5.9.

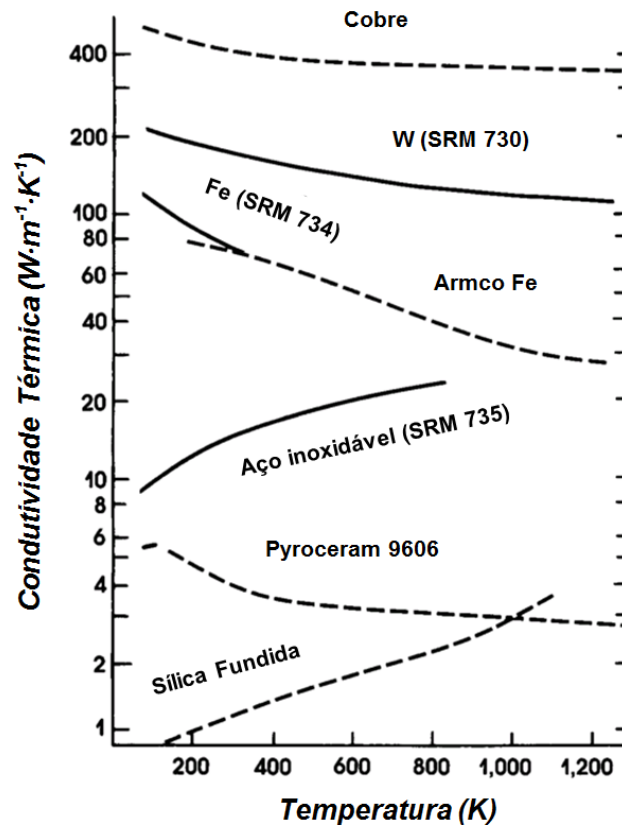


Figura 5.9 Valores aproximados de condutividade térmica para alguns dos possíveis materiais de calibração, adaptado de ASTM E1225-09 (2009)

Para a realização de ensaios em amostras de solo ou rocha, deverão ser utilizados materiais de referência como a Sílica fundida ou o *Pyroceram*. Estes apresentam condutividades térmicas similares às observadas nestes materiais, condição necessária para que sejam utilizados nas barras de calibração.

### 5.3.2. Regime variável

Os métodos em regime não estacionário ou variável, medem a condutividade térmica dos solos durante os estados de transição. Estes determinam a condutividade enquanto a temperatura do solo varia devido ao seu aquecimento ou arrefecimento (Moel *et al.*, 2010). Qualquer uma das metodologias que recorrem ao regime variável utiliza uma fonte de calor através da qual o material a ensaiar é aquecido. Permitem maior rapidez na realização e aquisição de dados, sendo contudo a análise matemática dos resultados consideravelmente mais complexa (Hemmingway e Long, 2012).

As referências à caracterização térmica de solos tendo por base métodos em regime variável são inúmeras, sendo utilizados frequentemente os seguintes dispositivos:

- *Hot Wire Method*;
- Sondas Térmicas;
- *Transient Plane Source*;

#### 5.3.2.1 Hot Wire Method

O *Hot Wire Method* (HWM) é um dispositivo que permite a determinação da condutividade térmica numa grande variedade de materiais. Esquemáticamente apresenta o aspecto ilustrado na Figura 5.10, onde se observam os dois componentes principais do dispositivo, a fonte de calor e o termopar.

O conceito subjacente à técnica é baseado no *Line Source Model* (LSM). Este modelo considera uma fonte de calor infinitamente extensa, que ao aquecer transmite calor ao solo, que o dissipa, gerando um fluxo radial de energia térmica. A sua primeira finalidade foi a determinação da condutividade térmica de materiais granulares, sendo actualmente possível a sua utilização para caracterização de sólidos líquidos e gases (Coment *et al.*, 2006). Diversos autores como Abu-Hamdeh *et al.* (2001), Coment *et al.* (2006) e Merckx *et al.* (2012) utilizaram o HWM nos seus trabalhos para caracterização térmica de solos, existindo ainda outros como Brandl (2006) e Clarke *et al.* (2008) que o referem como aplicável na caracterização térmica deste tipo de materiais naturais.

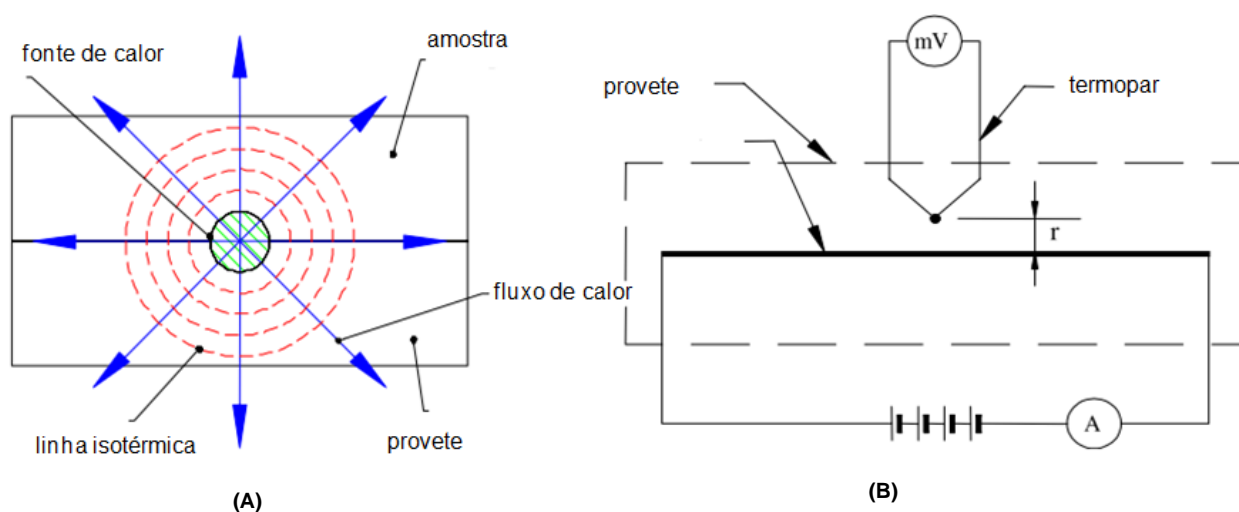


Figura 5.10 (A) Esquema de um dispositivo HWM (vista em planta) e (B) esquema do circuito eléctrico, adaptado de Franco (2007)



Nos provetes utilizados é necessário abrir um furo axial onde será introduzido o arame que constitui a unidade de aquecimento. A temperatura do solo é monitorizada ao longo do ensaio, sendo para isso utilizados um ou mais termopares. Através destes é possível averiguar qual a variação de temperatura  $\Delta T$  em diversos pontos do provete, para os quais se pode, ou não, conhecer a distância à unidade de aquecimento.

O método será descrito e analisado com maior detalhe no capítulo 6, por ter sido esta a metodologia seleccionada para realização da componente prática desta dissertação.

### 5.3.2.2 Sondas térmicas

As sondas térmicas, ou *Thermal Needle Probes*, que constituem um caso particular do HWM anteriormente apresentado, têm por base a medição da taxa de variação de temperatura da fonte de calor, quando esta é sujeita a aquecimento ou arrefecimento (Moel *et al.*, 2010). À semelhança do método anterior, partem do pressuposto básico de que a fonte de energia térmica é infinita, sendo a condutividade determinada com recurso à monitorização da dissipação de calor na agulha térmica (Barry-Macaulay *et al.*, 2013). O recurso a este ensaio é mais comum quando se pretende investigar sedimentos não consolidados, porém apresenta aplicabilidade também em rochas. A sua fiabilidade está fortemente associada ao bom contacto entre a agulha e o provete, devendo ser garantido que a transferência de calor se dá entre o solo e a sonda, e não entre a sonda e o ar que possa existir entre esta e o solo.

Existem sondas térmicas com diferentes configurações. Na bibliografia é possível encontrar essencialmente três tipos de dispositivos:

- Sondas simples;
- Sondas duplas;
- Sondas múltiplas;

As sondas simples são compostas por uma única sonda térmica. No seu interior estão inseridos diferentes componentes, de onde se destacam a fonte de calor e a unidade de medição de temperatura. A última pode ser um termístor ou termopar que permitem a monitorização temperatura a cada instante durante o decorrer do ensaio. As dimensões do dispositivo condicionam a sua aplicabilidade a um dado provete, Bording *et al.* (2013) referem que a dimensão deste deve ter em conta a extensão da agulha, pois só assim é possível evitar que exista influência das condições de fronteira nos resultados obtidos.

Na Figura 5.11 apresenta-se esquematicamente um dispositivo simples. De notar, que de fabricante para fabricante, podem existir pequenas modificações na geometria do aparelho bem como nos materiais utilizados para a sua construção.

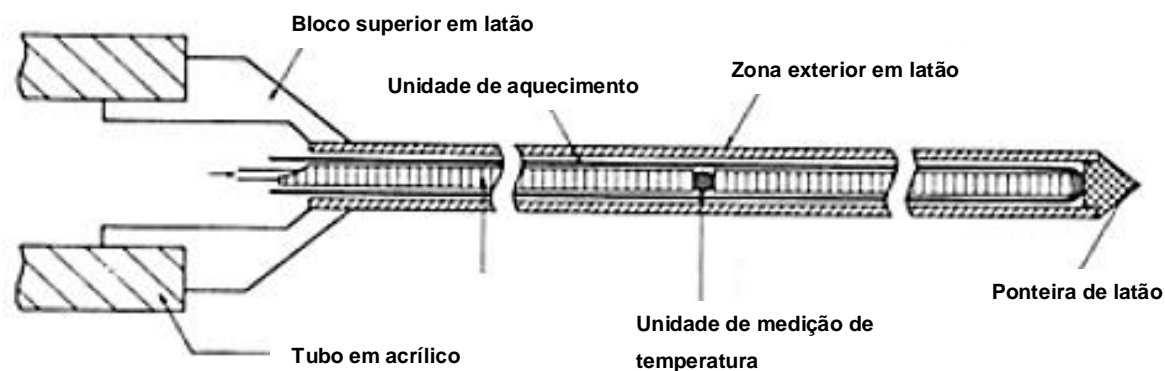


Figura 5.11 Principais componentes constituintes de uma sonda térmica (Bording *et al.*, 2013)

Os sistemas duplos foram inicialmente propostos por Campbell *et al.* em 1991 para a determinação em laboratório do calor específico e capacidade térmica volumétrica de solos (Kluitenberg *et al.*, 1995 e Knight e Kluitenberg, 2013). Actualmente são já utilizados para medição de outras propriedades como a condutividade e difusividade térmica (Abu-Hamdeh, 2001; Bristow, 1998; Liu e Si, 2011; Valente *et al.*, 2004). São constituídos por duas agulhas distintas, uma onde está instalada a unidade de aquecimento (sonda de aquecimento) e outra onde se encontra o termístor ou o termopar (sonda de medição) (Figura 5.12). As sondas de aquecimento e monitorização são dispostas paralelamente entre si, sendo conhecida a distância entre ambas.

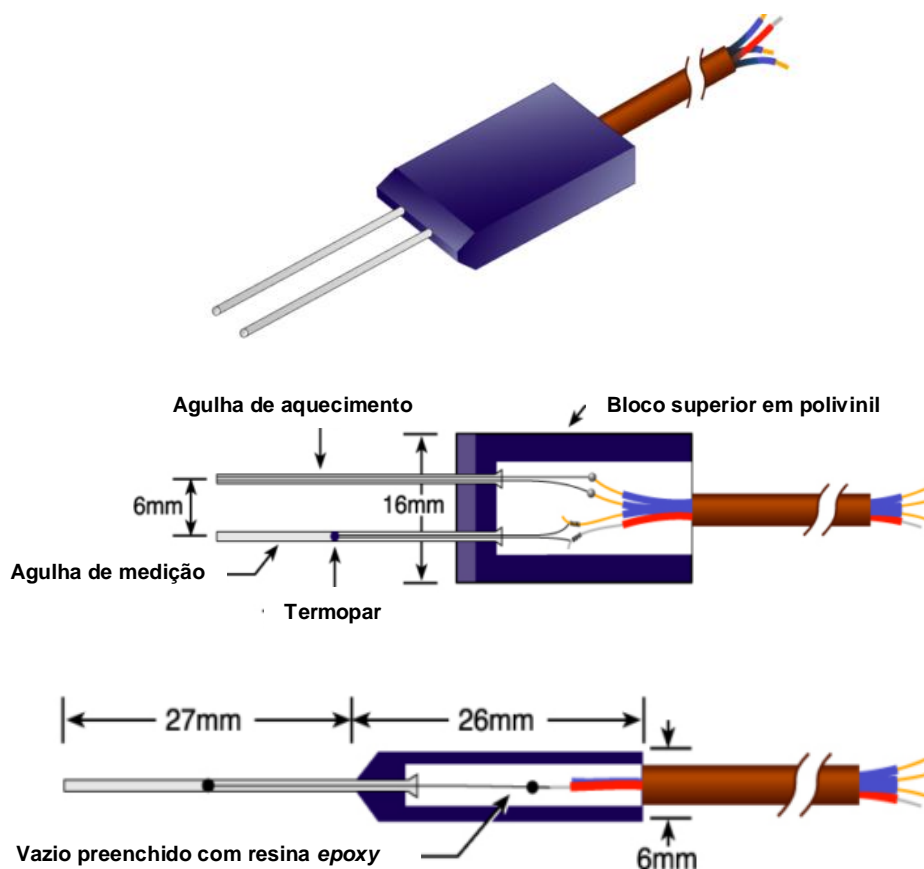
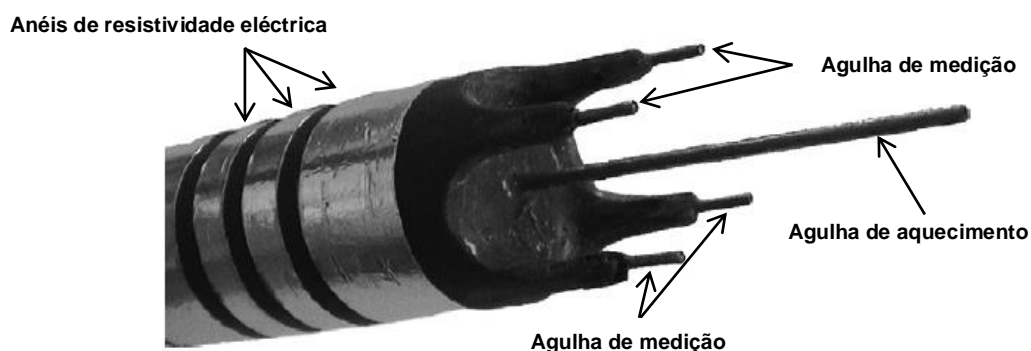


Figura 5.12 Sonda múltipla, adaptado de Knight e Kluitenberg (2013)

A condutividade e difusividade térmica bem como o calor específico são, segundo Bristow (1998), determinados através da resposta do solo à acção térmica imposta pela unidade de aquecimento ao longo do tempo  $t$  de ensaio.

Os dispositivos múltiplos apresentam não só funcionalidades relacionadas com a caracterização térmica, mas também com a avaliação de propriedades eléctricas e hidráulicas. Diversos autores, como Bristow *et al.* (2001), Liu e Si (2011) e Valente *et al.* (2006) utilizaram dispositivos deste tipo para a realização de estudos em solos, determinando tanto propriedades térmicas como eléctricas e hidráulicas. A título de exemplo, é ilustrado na Figura 5.13 o dispositivo desenvolvido por Valente *et al.*, (2006). Este conta com cinco agulhas, uma onde está instalada a unidade de aquecimento e as restantes equipadas com termístores. As últimas encontram-se dispostas em redor da unidade de aquecimento central, sendo através delas monitorizada a variação da temperatura no provete provocada pelo funcionamento da agulha central. O dispositivo inclui, ainda, quatro eléctrodos em forma de anel através dos quais é possível avaliar as propriedades eléctricas do solo. Também Mortensen *et al.* (2006) recorreram a dispositivos multifuncionais do mesmo tipo, através dos quais caracterizaram hidráulica e termicamente solos. Através do arranjo proposto pelos autores foi possível, utilizando múltiplas sondas, considerar a influência do fluxo de água na transferência de calor no solo. Tal facto constitui uma vantagem considerável em relação aos ensaios de laboratório abordados nesta dissertação.



**Figura 5.13 Sonda multifuncional, adaptado de Valente *et al.* (2006)**

O ensaio consiste na introdução da sonda no interior do provete de ensaio. A sonda é então sujeita a um aumento de temperatura durante um determinado intervalo de tempo. Durante este período, o calor gerado pela resistência térmica será transmitido ao provete de solo.

O procedimento pode apresentar algumas variações, consoante os autores e o tipo de dispositivos. Para Barry-Macaulay *et al.* (2013), utilizando sistemas com uma única sonda, o provete de solo deverá ser aquecido pela resistência térmica durante aproximadamente 30s, período durante o qual a temperatura deverá ser medida. Após a fase de aquecimento, o autor sugere que a monitorização da temperatura se mantenha. Assim, tendo em consideração esta metodologia, o cálculo da condutividade térmica é realizado utilizando dados provenientes tanto da fase de aquecimento como

de arrefecimento. Tal facto pode ser útil para realizar medições cíclicas por forma a avaliar se existe, ou não, histerese.

Por outro lado, para a ASTM D5334-05 (2005), que normaliza o ensaio em solos e rochas utilizando sondas simples, o período de aquecimento deve ser de pelo menos 1000s. Neste intervalo tempo, a potência imposta à unidade de aquecimento deve ser constante e conhecida. As medições de temperatura devem ser realizadas a cada 5s até ao primeiro minuto de ensaios, passando depois a ser obtidas com cadências de 30s. A fonte de calor deverá ser desligada quando, após os 1000s, a variação de temperatura entre duas medições consecutivas não exceda os 10K.

O procedimento de ensaio em sistemas duplos é ligeiramente diferente. Após a introdução do sistema no provete de ensaio, é iniciado o funcionamento da unidade de aquecimento existente numa das agulhas. Segundo Abu-Hamdeh (2001), Bristow (1998) e Kluitenberg *et al.* (1995) o ensaio deve iniciar-se com uma fase de aquecimento ( $t_h$ ) de 8s, período após o qual a unidade de aquecimento é desligada. Para os autores a monitorização deve ser efectuada durante todo o período de teste, que segundo Bristow (1998) deve ser de 75s com medições a cada 0,5s. Para Mortensen *et al.* (2006) a totalidade de tempo de ensaio deve ser de 120s.

O recurso a sondas térmicas do tipo agulha é muito frequente quando se pretende caracterizar termicamente solos, por permitirem a obtenção rápida e fiável de resultados. O aparecimento nos últimos anos de dispositivos que possibilitam a obtenção de dados não só térmicos, mas também hidráulicos e eléctricos, tem fomentado a sua aplicação de forma mais generalizada.

Segundo a ASTM D5334-05 (2005), que normaliza este ensaio utilizando dispositivos simples em solos e rochas brandas, os dados obtidos durante o ensaio devem ser apresentados em forma de gráfico semi-logarítmico. Nesse gráfico o tempo é apresentado em abcissas e a temperatura em ordenadas. A curva obtida deverá exibir um trecho linear, designado como zona *quáasi*-estacionária. São então seleccionados dois pontos nessa zona correspondentes às temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ , medidas nos instantes  $t_1$  e  $t_2$ . Tendo por base os pontos  $(t_1, T_1)$  e  $(t_2, T_2)$ , a norma ASTM D5334-05, sugere que a condutividade térmica seja determinada utilizando a equação (5.69).

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \times (T_2 - T_1) \cdot l_a} \times \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (5.69)$$

em que  $\dot{Q}$  é o calor transferido por unidade de tempo, dado pela equação (5.57) e  $l_a$  o comprimento da unidade de aquecimento.

### 5.3.2.3 *Transient plane source*

O *Transient Plane Source* (TPS), também conhecido como *Hot-disk method* é especialmente utilizado para determinação da condutividade térmica de materiais sólidos. É possível encontrar na bibliografia alguns autores que o aplicaram para determinar as propriedades térmicas de rochas. Destaca-se Zeb *et al.* (2010), cujo trabalho incide na caracterização térmica de dunitos, rochas vulcânicas porosas, e Bentz (2007), que utilizou esta técnica para caracterização térmica de pastas de cimento no estado

fresco. Em solos, apenas Moel *et al.* (2010) refere o TPS como uma das formas de determinação de propriedades térmicas, não existindo porém referência a nenhum trabalho prático.

O método TPS utiliza um sensor cuja função é múltipla, funcionando em simultâneo como fonte de calor e termómetro (Gustafsson, 1991). O sensor, de forma circular e de espessura reduzida, é colocado entre dois provetes. Durante a execução do ensaio a energia térmica produzida pela unidade de aquecimento não deve em nenhum caso atingir as superfícies exteriores do conjunto. Desta forma, é garantido que não existe influência das condições de fronteira nos resultados obtidos.

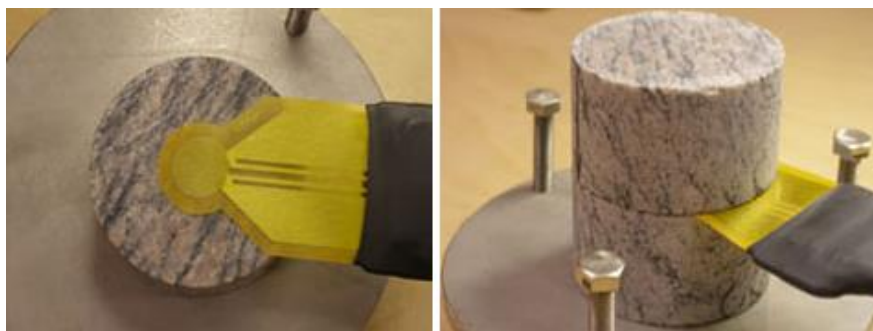


Figura 5.14 *Transient Plane Source* instalado entre dois provetes de gneisse (fonte: [http://www.sp.se/en/index/resources/firetechnology/equipment/tps\\_brk/sidor/default.aspx](http://www.sp.se/en/index/resources/firetechnology/equipment/tps_brk/sidor/default.aspx))

O calor é originado pela passagem da corrente eléctrica pela unidade de aquecimento (efeito Joule). A temperatura e potência dissipada pela TPS são registadas, sendo posteriormente utilizadas para determinação da condutividade e difusividade térmica. É também possível obter através deste método o calor específico do material ensaiado.

Para que esta metodologia de determinação de condutividade térmica seja aplicada é necessário que sejam assumidos alguns pressupostos teóricos. Malinarič (2013) afirma que deve ser aceite *à priori*, que o TPS é constituído por fontes de calor concêntricas com igual espaçamento entre si, a espessura e a capacidade térmica do dispositivo TPS é desprezável, não existe resistência térmica entre o dispositivo e os provetes de ensaio, o provete é infinito em todas as direcções do espaço e por fim, a energia é transmitida ao dispositivo por níveis.

#### 5.4. Ensaio de laboratório para determinação do calor específico

A determinação do calor específico de um solo pode ser realizada através do método do calorímetro, também designado por método das misturas (ASTM D4611-08, 2008). Permite a obtenção da referida propriedade para temperaturas entre os 25°C e 300°C, sendo adequada a sua aplicação a solos e rochas. Segundo aquela norma a sua aplicabilidade limita-se a materiais secos, contudo, Abu-Hamdeh (2003) e Alnefaie e Abu-Hamdeh (2013) referem a sua aplicabilidade a solos húmidos mediante algumas adaptações.

O calorímetro é constituído por um frasco ou vaso de *Dewar* contendo no seu interior um agitador magnético, um termómetro e o fluido calorimétrico (Figura 5.15).

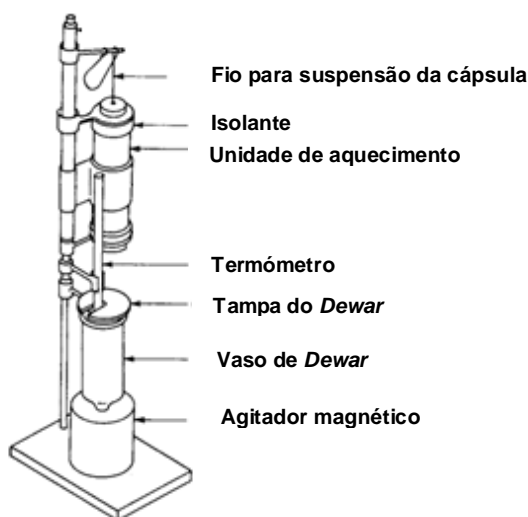


Figura 5.15 Calorímetro ideal, adaptado de ASTM D4611-08 (2008)

O frasco é selado no topo com uma tampa de reduzida condutividade térmica, para garantir pequenas variações de temperatura no seu interior. Os frascos de *Dewar* constituem recipientes termicamente isolados do exterior, não permitindo por isso transferência de energia térmica significativa com a atmosfera exterior de ensaio. Acima do calorímetro, existe ainda uma unidade de aquecimento no interior da qual é inserida uma cápsula de cobre ou aço inox contendo o provete de solo a ensaiar.

O procedimento de ensaio inicia-se com a introdução do fluido calorimétrico no *Dewar* e da cápsula contendo o solo no interior da unidade de aquecimento. O solo é então aquecido até ser atingido o equilíbrio térmico no interior da unidade de aquecimento. Nessa altura, a tampa do *Dewar* é removida e a cápsula contendo o solo colocada no seu interior. O agitador inicia o seu funcionamento para que seja homogeneizada a temperatura. O ensaio termina quando a temperatura no interior do *Dewar* é aproximadamente constante. As temperaturas são geralmente apresentadas em função do tempo de ensaios, tal como se ilustra na Figura 5.16.

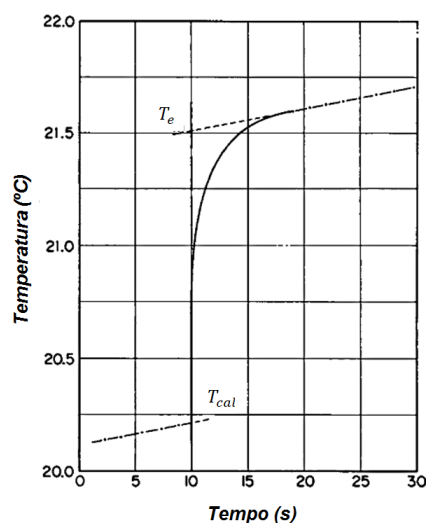


Figura 5.16 Gráfico típico de um ensaio realizado pelo método das misturas, adaptado de ASTM D4611-08 (2008)

Segundo a norma ASTM D4611-08 (2008), o calor específico é então determinado pela seguinte expressão:

$$c_{solo,d} = \frac{(T_e - T_{cal}) \cdot c_{cal} \cdot W_{cal} - (T_d - T_e) \cdot c_{cal} \cdot W_{cal}}{(T_d - T_e) \cdot W_{solo,d}} \quad (5.70)$$

em que  $T_{cal}$  é a temperatura do calorímetro antes da mistura,  $T_e$  a temperatura de equilíbrio após a mistura,  $T_d$  a temperatura do solo seco antes de entrar no *Dewar*,  $W_{cal}$  a massa do calorímetro e fluido calorimétrico,  $W_{solo,d}$  a massa de solo seco e  $c_{cal}$  o calor específico do calorímetro e fluido calorimétrico. Em Alnefaie e Abu-Hamdeh (2013) os autores utilizam a mesma formulação, substituindo porém  $c_{cal}$  pelo calor específico da água e  $W_{cal}$  pelo respectivo peso.

A determinação do calor específico do solo no estado húmido é realizada misturando solo seco com o solo húmido para o qual se conhece o teor em água (Alnefaie e Abu-Hamdeh, 2013). O solo seco, para o qual se deve conhecer o calor específico, é colocado no interior do calorímetro e aquecido até uma dada temperatura constante. O solo húmido, também ele a temperatura constante e conhecida, é posteriormente inserido no calorímetro e misturado com o solo seco até que se atinja a temperatura de equilíbrio. O calor específico é então dado por:

$$c_{solo,d} = \frac{(T_d - T_e) \cdot c_{solo,d} \cdot W_{solo,d}}{(T_e - T_h) \cdot W_{solo,h}} \quad (5.71)$$

onde  $T_h$  é a temperatura do solo húmido antes da mistura e  $W_{solo,h}$  a sua massa.

## 5.5. Ensaios *in situ*

A determinação de propriedades térmicas dos solos pode também ser realizada com recurso a ensaios de campo. A diversidade existente para caracterização térmica de solos não é grande, havendo apenas testes de resposta térmica (TRT) e dispositivos similares às sondas térmicas de laboratório, devidamente adaptadas às condições de campo.

Os TRT, apesar de serem descritos como essenciais para o projecto e dimensionamento dos GES, são menos utilizados comparativamente aos ensaios de laboratório em virtude dos seus custos significativamente mais elevados. Não obstante isto, e tal como referido por Mattsson *et al.* (2008) e Sanner *et al.* (2008), o conhecimento de algumas características específicas do local de implementação como sejam a condutividade térmica, a resistência térmica do furo e a temperatura não perturbada do solo são necessárias para um adequado dimensionamento de um sistema de baixa entalpia. Alguns destes parâmetros, como é evidente, apenas podem ser determinados com fiabilidade quando obtidos através de ensaios realizados no local de implementação do empreendimento. Outros, como a condutividade térmica ou o calor específico, apesar de ser possível a sua determinação em laboratório, podem apresentar menor fiabilidade por não ser possível reproduzir em laboratório algumas das condições específicas do local.

### 5.5.1. Testes de Resposta Térmica (TRT)

Os testes de resposta térmica (TRT), ou *Geothermal Response Tests* (GRT), constituem os ensaios de campo com maior utilização para determinação de propriedades térmicas que importam para o dimensionamento de GES. Os seus primeiros desenvolvimentos iniciaram-se em 1983, quando Morgensen os apresentou como método de ensaio, com o qual era possível determinar *in situ* a condutividade térmica do subsolo e a resistência térmica dos BHE. O método passou então a designar-se por método de Morgensen, tendo daí em diante sido aplicado posteriormente para avaliação de BHE já existentes (Gehlin, 2002). Nas últimas décadas, e em especial na segunda metade da década de 90 do século XX, este tipo de ensaios foi amplamente desenvolvido e melhorado em universidades como a *Luleå University of Technology*, que criou em 1995 um TRT portátil, ou a *Oklahoma State University*, que iniciou o seu trabalho nesta área a partir de 1996. Nos últimos anos tem vindo a ser desenvolvidos em diversos países novos dispositivos para realização de TRT's, encontrando-se hoje equipamentos deste tipo na Europa, Ásia, América do Norte e América do Sul, especialmente no Chile (Mattsson *et al.*, 2008).

Com base em TRT's é possível determinar de forma adequada as propriedades térmicas do meio considerando todo o fluxo de calor, a água subterrânea, bem como outros factores que condicionam o comportamento térmico do sistema solo (Mattsson *et al.*, 2008). A sua elevada fiabilidade é no essencial resultado da consideração do volume total de calor transportado no subsolo, bem como pela consideração de alguns parâmetros perturbadores como o fluxo de água subterrâneo. Para Sanner *et al.* (2008), em virtude da consideração destas perturbações, os dados de condutividade térmica obtidos por ensaios TRT constituem valores efectivos, sendo a condutividade designada por condutividade térmica efectiva, ( $\lambda_{eff}$ ).

O equipamento é constituído por um sistema fechado (tipo *closed loop*), no interior do qual se faz circular um fluido de transporte de energia aquecido por meio de uma unidade de aquecimento (Figura 5.17). O ensaio clássico consiste, segundo *American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers* ASHRAE (2005, citada em Raymond *et al.* (2011)), em fazer circular no interior do permutador de calor o fluido de transporte avaliando à entrada e saída a sua temperatura.

Os ensaios são efectuados em furos de sondagem, onde são posteriormente introduzidos os BHE, sendo necessário garantir um adequado contacto entre os tubos permutadores de calor e as paredes do furo. Tal garantia é obtida através da utilização de preenchimentos especiais de que são exemplo as lamas bentoníticas ou caldas de cimento. Segundo Gehlin (2002), as primeiras fornecem não só um adequado contacto entre os BHE e o subsolo, mas também uma barreira anti-contaminação, pois, devido à sua baixa permeabilidade condicionam o fluxo axial de contaminantes. Adicionalmente são ainda uma forma de manter o artesianismo de determinadas unidades produtivas. Contudo, nem sempre são utilizados este tipo de materiais, segundo o mesmo autor, em países como a Suécia ou a Noruega os furos são apenas preenchidos com água ou com o material proveniente da furação, o que pode eventualmente potenciar o aparecimento de problemas ambientais. Para além do referido, a utilização de água como material de preenchimento favorece o aparecimento de transferência de



calor por convecção. Este mecanismo de transferência pode desempenhar um papel importante no comportamento térmico do BHE (Hellström e Gehlin, 2000), e em determinados casos resultar em valores de propriedades superiores ao real. A utilização de preenchimentos mais viscosos evita o aparecimento de fenómenos convectivos, pois são necessárias maiores diferenças de temperatura para que ocorram correntes de convecção. Os tubos permutadores são geralmente do tipo *U-pipe*, *double U-pipe* ou coaxiais. Hellström e Gehlin (2000) afirmam que os últimos revelam menores resistências térmica comparativamente aos sistemas com *single U-pipes*. Os *double U-pipes* apresentam valores de resistência iguais ou ligeiramente superiores aos tubos coaxiais.

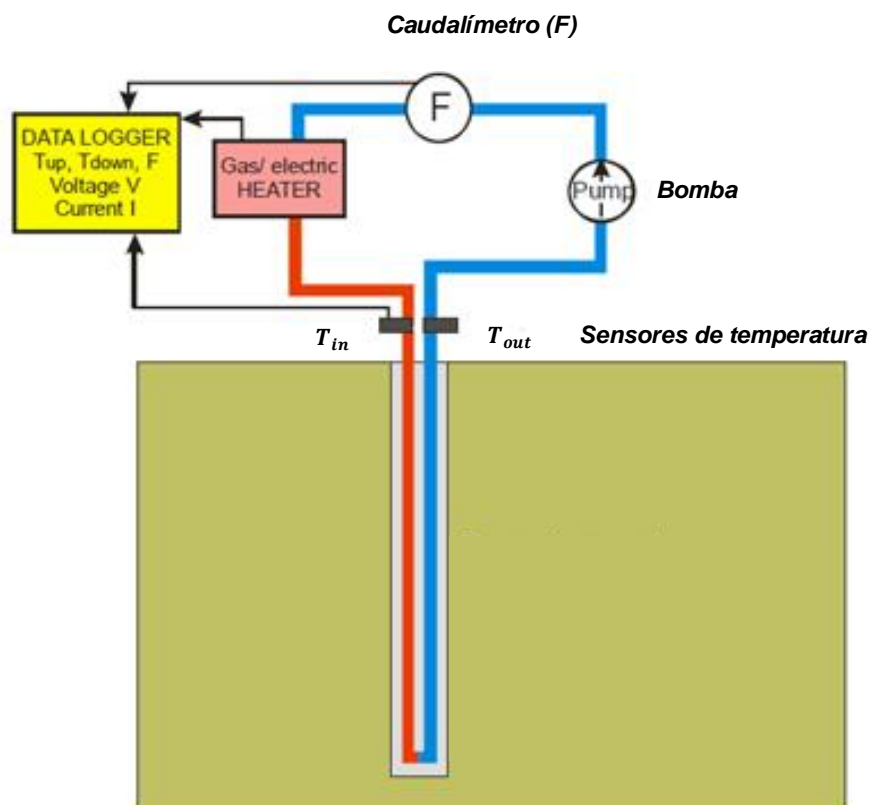


Figura 5.17 Esquema ilustrativo da configuração de um TRT, adaptado de McCorry e Jones (2011)

O início dos ensaios é determinado tendo em conta o momento em que se procedeu ao preenchimento dos furos. Segundo a *International Organization for Standardization* (2013), onde são propostos procedimentos de realização de TRT's, os ensaios devem ter início, no caso de solos com baixa condutividade, cinco dias após o preenchimento. Por outro lado, em presença de solos de alta condutividade o tempo de repouso entre o preenchimento e o início do ensaio deve ser de pelo menos três dias. A referida recomendação considera ainda que para casos cuja furação seja realizada com recurso a circulação com ar, introduzindo calor no subsolo, ou em furos cujo preenchimento seja realizado com materiais que promovam reacções exotérmicas, devem ser tidos em consideração intervalos de tempo entre a furação e o preenchimento superiores a cinco dias.

O tempo de duração do ensaio não é consensual, variando consoante os autores. Segundo a pré-norma ISO/DIS 17628 (2013) e Sanner *et al.* (2008) o TRT deve decorrer durante um período

superior a 48 horas. A ISO refere ainda uma metodologia de cálculo para o tempo de execução após o período mínimo de ensaio, tendo por base o raio interno do tubo permutador de calor  $r_0$ , em metros, e a difusividade térmica  $\alpha$ , em  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ . O tempo mínimo ( $t_{min}$ ) é então dado pela expressão:

$$t_{min} = \frac{5 \times r_0^2}{\alpha} \quad (5.72)$$

Outros autores, como Mc Corry e Jones (2011), referem com base nas recomendações propostas pela da ASRAE em 2002 e 2007, que o TRT deve ter duração entre 36 e 48 horas, a *International Energy Association*, citada em Mc Corry e Jones, (2011), recomenda uma duração de 50 horas, intervalo de tempo mínimo admissível para Skouby *et al.* (1998 e 1999 citado em Sanner *et al.* (2005)). Hellström e Gehlin (2000), por sua vez consideram adequada a duração entre 60 e 72h. A repetição de ensaios deve, também, ter em conta o período necessário para a estabilização da temperatura após a realização de um ensaio. Para terrenos com alta condutividade devem ser considerados períodos superiores a 10 dias, por sua vez, para materiais com condutividades baixas o tempo de espera entre dois ensaios consecutivos deve ser de pelo menos 14 dias ou até a temperatura do permutador de calor atingir um valor que não exceda em  $0,28^\circ\text{C}$  a temperatura natural média do solo.

A realização do ensaio apresenta alguns condicionalismos. Segundo Sanner *et al.* (2008) o principal ocorre quando se verificam fluxos de água subterrânea relevantes, que podem mascarar os resultados obtidos. Outros factores condicionantes prendem-se com as condições climatológicas e com as dificuldades relacionadas com a estabilização da potência dissipada pelas unidades de aquecimento.

Tal como em todos os métodos referidos anteriormente, os dados obtidos nos TRT's não fornecem directamente os valores das grandezas térmicas necessárias para a caracterização dos solos. Assim, à semelhança do que acontece restantes ensaios, também estes recorrem a fórmulas matemáticas que permitem relacionar as leituras realizadas com as grandezas que se procura determinar. Para ISO/DIS 17628 (2013) a avaliação dos testes de resposta térmica pode ser efectuada segundo duas metodologias diferentes. Uma baseada na aproximação do caso de estudo à teoria da fonte de calor linear, LSM, ou outra utilizando modelos numéricos para estimação dos parâmetros. Segundo Mattsson *et al.* (2008), a avaliação pode ser também baseada num modelo com fonte de calor cilíndrica (*Cylindrical Source Mode* – CSM) que considera o furo permutador de calor como um cilindro de comprimento infinito e de raio com dimensão não desprezável. Os modelos numéricos como afirmado por McCorry e Jones (2011) e Sanner *et al.* (2005) apresentam grande complexidade e custos. Porém, constituem avaliações com potencial de conferir maior precisão aos resultados obtidos.

O *Line Source Model* (LSM) é solução mais utilizada para realização da análise dos TRT, constituindo mesmo a metodologia a utilizar segundo a pré-norma ISO/DIS 17628. A sua aplicação requer que após o período inicial de medição, cerca de 10 a 15h, a curva resultante apresente um comportamento rectilíneo, ou variações periódicas, que se equilibrem durante o decorrer do ensaio.

Considera, *à priori*, que a transferência de calor na direcção radial é puramente por condução e aproximadamente constante ao longo de todo o BHE. Para Mattsson *et al.*(2008), os resultados obtidos são tanto melhores quanto mais longo for o regime transitório de condução de calor.

Os resultados são geralmente apresentados em forma de gráfico, onde são dispostas as temperaturas de entrada e saída do furo, bem como a potência dissipada pela unidade de aquecimento. O *output* geralmente corresponde a um gráfico semelhante ao ilustrado na Figura 5.18, onde são visíveis duas curvas. Uma correspondente à potência dissipada pela unidade de aquecimento (cinzento) e a outra correspondente à evolução da temperatura durante o decorrer do ensaio (preto).

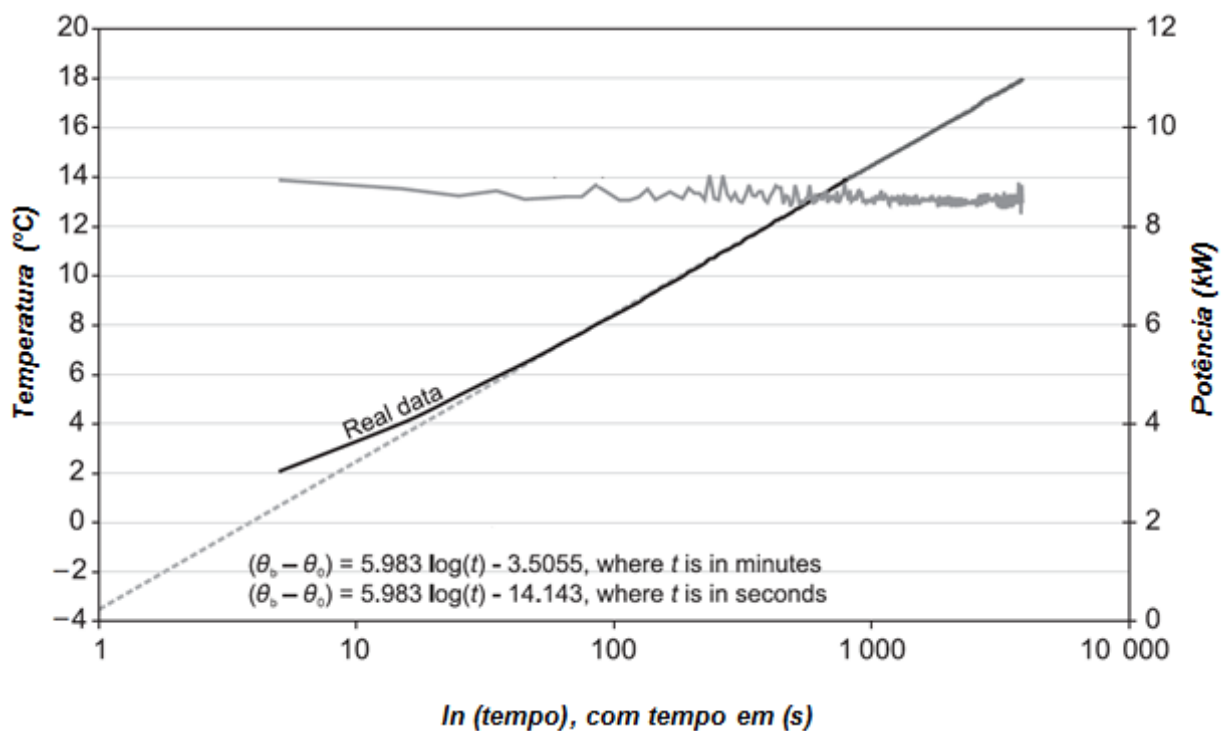


Figura 5.18 Output típico de um ensaio TRT, adaptado de Banks (2012)

A condutividade térmica obtida pelo TRT, como referido anteriormente, engloba diversos factores que não estão directamente relacionados com o material que constitui o solo. Devido a esse facto o ensaio fornece um valor efectivo de condutividade, que com base no LSM, pode ser obtida pela expressão:

$$\lambda_{eff} = \frac{\dot{Q}_{solo}}{S \cdot 4 \cdot \pi \cdot H} \quad (5.73)$$

Em que  $H$  é comprimento do furo permutador de calor e  $\dot{Q}_{solo}$  é a potência dissipada para o solo (calor por unidade de tempo), dada pela equação (5.74). O declive  $S$  é obtido através de um ajuste

por regressão linear simples, na zona mais linear da curva. Um exemplo desse procedimento está patente na Figura 5.18 (recta a tracejado).

$$\dot{Q}_{solo} = (T_{in} - T_{out}) \cdot C_{v,fluido} \cdot F \quad (5.74)$$

Com base a calor fornecido ao solo por unidade de tempo  $\dot{Q}_{solo}$  (W), no comprimento do furo  $H$  (m), na temperatura não perturbada do subsolo,  $T_0$  (°C), na temperatura do fluido no instante  $t$ ,  $T_f$  (°C), na condutividade térmica  $\lambda$  (W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>), no raio do furo  $r_b$  (m) e na difusividade térmica ( $\alpha$ ) é possível obter a resistência térmica do furo. Esta é dada pela seguinte expressão matemática:

$$R_b = \frac{H}{\dot{Q}_{solo}} \cdot (T_f - T_0) - \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \lambda} \cdot \left[ \ln t + \ln \left( \frac{4 \cdot \alpha}{r_b^2} \right) - 0,5772 \right] \quad (5.75)$$

Esta propriedade é intrínseca ao furo permutador de calor, sendo por isso dependente das suas dimensões, do material que constitui o seu preenchimento e da configuração dos tubos permutadores de calor nele instalados. Com base em TRT's realizados, Mc Corry e Jones (2011) referem que os valores desta propriedade variam ente 0,01m·K·W<sup>-1</sup>, para sistemas abertos com tubos permutadores coaxiais, e 0,25 m·K·W<sup>-1</sup> para configurações com *single U-pipes* inseridos em furos preenchidos com bentonite. No caso das estruturas termoactivas, a utilização do betão como material de preenchimento favorece a diminuição da resistência térmica do furo.

A temperatura não perturbada do solo, apesar de se apresentar em último lugar, é a primeira das propriedades a determinar quando se realiza um TRT. Zhang *et al.* (2014) consideram-na indispensável para o dimensionamento de sistemas GES onde são incluídas GSHP, sendo também requerida para a obtenção da resistência térmica do furo. Segundo Gehlin e Nordell (2003) e Hellström e Gehlin (2000), a temperatura natural do solo pode ser obtida por dois métodos distintos: um utilizando a temperatura do fluxo de água nos tubos permutadores e outro realizando o perfil térmico do furo. No primeiro caso, o fluido é colocado em circulação através de uma bomba, sendo as temperaturas lidas durante cerca de meia hora. Segundo os autores, durante a utilização deste método considera-se a existência de transferência de calor ao fluido de circulação por parte do sistema de bombagem. Este, devido ao seu funcionamento aquece, o fluido, ao passar no interior da bomba absorverá calor, dissipando-o à medida que percorre o BHE. Deste modo, os resultados obtidos por este procedimento devem ser utilizados com alguma atenção. O segundo método é para os autores citados o mais fiável, apesar de ser menos utilizado que o primeiro. Consiste na introdução de um termopar no interior do tubo permutador do tipo *U-pipe*. O termopar, à medida que desce ao longo do tubo vai registando as temperaturas a diferentes profundidades. No final, a temperatura não perturbada do solo é obtida pela média aritmética de todas as leituras. A utilização de qualquer uma das metodologias deve, nos casos necessários, ter em consideração o gradiente geotérmico (Hellström e Gehlin, 2000; Zhang *et al.*, 2014).

A aplicação de TRT's em empreendimentos que utilizem estruturas termoactivas deve ser cuidada. O ensaio clássico encontra-se normalizado para furos com diâmetros inferiores aos normalmente utilizados em estacas. Contudo, a *Ground Source Heat Pump Association*, sugere uma metodologia

que permite a sua execução de forma normalizada em estacas com diâmetros até 300mm (Loveridge *et al.*, 2014). A necessidade de adaptação do procedimento quando aplicado em estruturas termoactivas, advém do facto de, comparativamente aos furos permutadores convencionais, as estacas apresentarem menores comprimentos e maiores diâmetros. Segundo Loveridge (2012) tal facto resulta em maiores intervalos de tempo até que seja atingido o regime estacionário.

## **6. Caracterização em laboratório de um solo pelo *Hot Wire Method***

### **6.1. Considerações iniciais**

Neste capítulo apresenta-se a caracterização de um solo arenoso tendo em vista a determinação da sua condutividade térmica. Para cumprimento do objectivo foi utilizado um dispositivo montado pela Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Beja (ESTIG) que permitiu a obtenção de alguns dados relativos ao estudo da condutividade térmica do solo investigado.

Numa primeira fase foi realizada a caracterização geotécnica básica, pela qual foram obtidas as propriedades índice do solo e a sua respectiva classificação. Seguiu-se a realização de ensaios térmicos, tendo como objectivo a determinação da condutividade térmica de dois materiais distintos. Em primeiro lugar apresentam-se resultados para a glicerina, material com condutividade conhecida e descrita na bibliografia, o que permitiu a confrontação dos resultados obtidos experimentalmente com os existentes na bibliografia. Em segundo lugar, apresentam-se os resultados obtidos para uma areia com condutividade térmica desconhecida.

### **6.2. Método e metodologia de ensaio**

#### **6.2.1. Base teórica**

O dispositivo montado com base no *Hot Wire Method* tem como princípio fundamental o modelo da fonte de calor linear (*Line Source Model*). Este considera uma fonte de calor linear, infinita e com diâmetro infinitamente pequeno relativamente ao volume total em estudo.

Para a aplicação desta metodologia na determinação da condutividade térmica é considerado um provete cilíndrico, cuja relação altura-diâmetro é suficientemente grande para que possam ser desprezados os efeitos de fronteira. O material que o constitui é considerado homogéneo e isotrópico e com propriedades térmicas constantes no tempo.

Naquelas condições, a condução de calor no provete pode ser definida pela equação geral da difusão de calor em coordenadas cilíndricas (equação (6.1)).

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \cdot \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r_a^2} + \frac{1}{r_a} \frac{\partial T}{\partial r_a} \right) \quad (6.1)$$

onde  $r_a$  é a distância radial entre a fonte de calor e um dado ponto do provete e  $\alpha$  a difusividade térmica.

Segundo Franco (2007), em regime variável de transferência de calor e para um período de aquecimento suficientemente grande, a temperatura num dado ponto à distância  $r_a$  da fonte de calor pode ser determinada através da equação:

$$T(r_a, t) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \left[ \ln \left( \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_a^2} \right) + \frac{r_a^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} - \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{r_a^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} \right) - \dots - \gamma \right] \quad (6.2)$$

onde  $t$  é o tempo (s),  $\dot{Q}$  a potência dissipada como calor pela unidade de aquecimento (W),  $\gamma$  a constante de Euler e  $l_a$  o comprimento da unidade de aquecimento (m). Segundo o mesmo autor, caso se verifique a condição imposta pela equação (6.3):

$$\frac{r_a^2}{4 \cdot \alpha \cdot t} \ll 1 \quad (6.3)$$

a equação (6.2) pode ser reescrita de forma simplificada como:

$$T(r, t) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \left[ \ln \left( \frac{4 \cdot \alpha \cdot t}{r_a^2} \right) - \gamma \right] \quad (6.4)$$

$$T(r, t) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \left[ \ln t + \ln \left( \frac{4 \cdot \alpha}{r_a^2} \right) - \gamma \right] \quad (6.5)$$

A diferença de temperatura verificada entre dois instantes  $t_1$  e  $t_2$  permite a determinação da condutividade térmica do material em análise. Para isso, é necessário realizar leituras periódicas de temperatura durante o aquecimento que são geralmente apresentadas num gráfico semi-logarítmico. No eixo das ordenadas são colocados os valores das medições de diferença de temperatura ( $\Delta T$ ) e no das abscissas os valores de  $\ln(t)$ . Caso sejam verificadas as condições de validade da equação (6.5) a diferença de temperatura nos referidos instantes é dada por:

$$T(t_2) - T(t_1) = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \lambda \cdot l_a} \cdot \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (6.6)$$

Resolvendo a equação (6.6) em ordem à condutividade térmica resulta:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot \Delta T \cdot l_a} \cdot \ln \left( \frac{t_2}{t_1} \right) \quad (6.7)$$

Com base na curva experimental é possível obter o valor de condutividade térmica. Para isso é seleccionado o trecho recto, que deve estar compreendido entre os instantes para os quais as equações anteriormente enunciadas são válidas. Essa zona deve estar isenta da influência da

fronteira, bem como das perturbações iniciais inerentes ao início do funcionamento do dispositivo. O trecho recto da curva experimental pode ser definido segundo diferentes métodos, de onde se destaca o *Maximum R<sup>2</sup> Method* (MAR), utilizado nesta dissertação, e o *Maximum Slope Method* (MAS). Segundo Wang e Hayakawa (1993) o MAR recorre ao coeficiente de determinação para encontrar a zona onde se verifica a maior linearidade da curva. Na impossibilidade de aplicação de métodos computacionais no caso em estudo, a análise do máximo valor de  $R^2$  foi conseguida através da estudo visual da curva. Foram testadas várias opções para cada um dos ensaios realizados, tendo sido seleccionado o melhor ajuste que se definiu ser aquele em que o coeficiente de determinação  $R^2$  fosse superior 0,990.

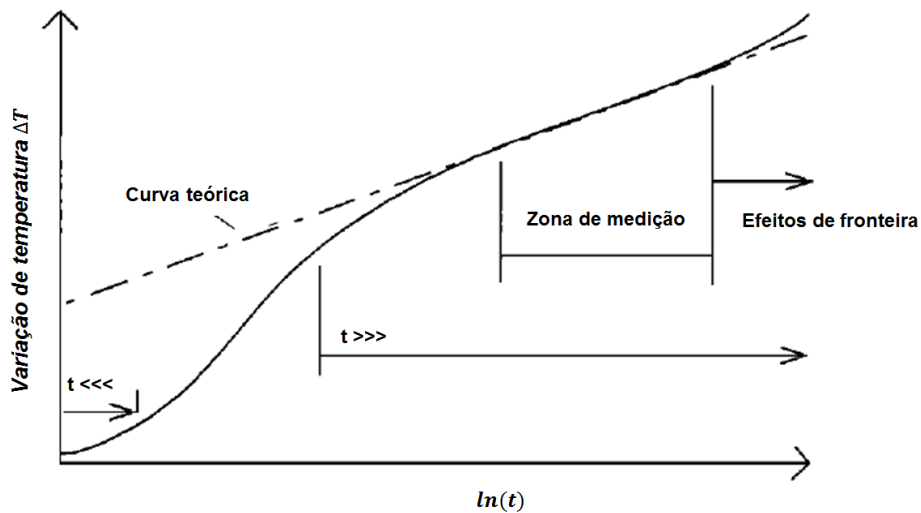


Figura 6.1 Gráfico tipo para um ensaio térmico pelo HWM, adaptado de Presley e Christensen (1997)

A equação (6.7) pode então ser escrita na sua forma experimental substituindo a parcela  $\frac{\ln(\frac{t_2}{t_1})}{\Delta T}$  por  $\frac{1}{S}$ , obtendo-se:

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4 \cdot \pi \cdot l_a} \cdot \frac{1}{S} \quad (6.8)$$

onde  $S$  é o declive da recta definida pela equação 6.6 que é coincidente com a recta de ajuste por regressão linear dos pontos experimentais na zona de medição.

### 6.2.2. Descrição do Sistema de Ensaio

O sistema de ensaio utilizado ilustra-se na Figura 6.2. Inclui uma fonte de calor linear de Constantan, um termopar do tipo  $T$ , cobre-Constantan, um termómetro, uma câmara de ensaio, uma fonte de energia e três multímetros.

Os multímetros permitem a monitorização da intensidade de corrente fornecida pela fonte de energia (Amperímetro), da diferença de potencial estabelecida entre os extremos da fonte de calor (Voltímetro 1) e da diferença de potencial existente entre os dois extremos do termopar (Voltímetro 2). A câmara



de ensaio encontra-se suspensa através da utilização de um suporte universal, com o qual é possível manter a sua verticalidade.

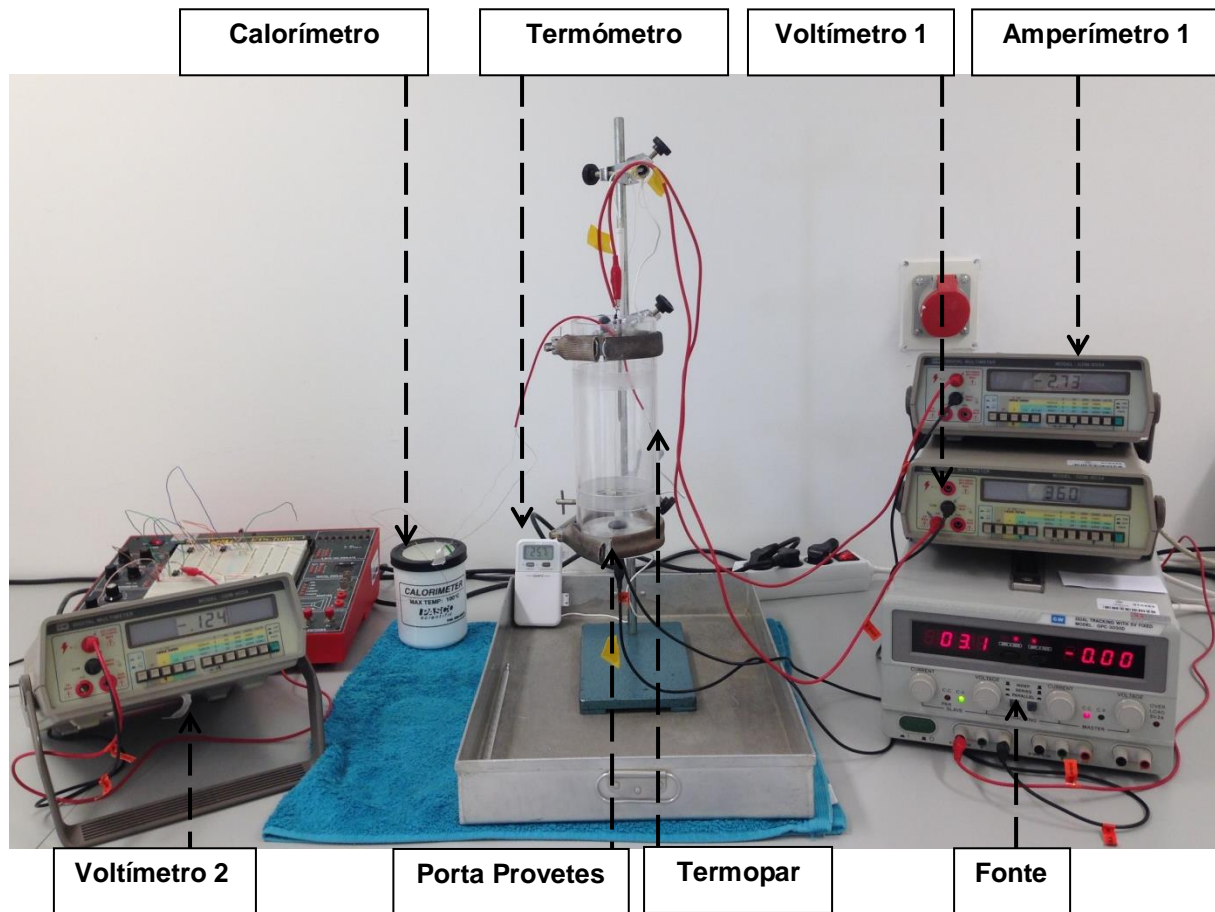


Figura 6.2 Dispositivo utilizado para realização dos ensaios na ESTIG-IPBeja

A montagem é simples, sendo no entanto fundamental assegurar bons contactos entre todos os fios existentes no circuito, para que não existam, ou sejam mínimas, as oscilações na intensidade de corrente ( $I$ ), resistência eléctrica ( $R_e$ ) e na potência dissipada  $\dot{Q}$ . Por forma a minimizar estes problemas, as ligações entre a unidade de aquecimento e os fios provenientes da fonte de energia eléctrica foram soldados com solda quente de estanho.

#### 6.2.2.1 Fonte de calor

A fonte de calor, ou unidade de aquecimento, constitui o componente do dispositivo através do qual é possível gerar calor. A energia eléctrica é fornecida ao sistema, através de uma fonte de alimentação, que deve ser capaz de manter potência constante durante o decorrer do ensaio. Ao ser garantida esta condição, é possível determinar a quantidade de calor que é dissipado pela unidade de aquecimento, utilizando para esse propósito a Lei de Joule. Neste trabalho foi utilizada uma fonte de alimentação da marca *GWInstek* modelo GPC-3030DQ.

A unidade de aquecimento é composta por um fio, cujo diâmetro deve ser de reduzida dimensão comparativamente ao seu comprimento. Para Merckx *et al.* (2012), apenas são viáveis ensaios com

unidade de aquecimento em que o quociente entre o comprimento e o diâmetro do fio seja superior a 200. O seu material de fabrico é outro dos factores importantes a considerar. Nos seus trabalhos, Franco (2007) utilizou *Stablohm B*<sup>®</sup>, uma liga metálica de níquel, cobre, alumínio e crómio, Merckx *et al.* (2012) optaram por um fio de níquel de elevada pureza. Nos ensaios realizados no decurso desta dissertação foi utilizado o Constantan, uma liga metálica de cobre, níquel, manganês e ferro, que apresenta oscilações na sua resistência eléctrica muito reduzidas para as temperaturas de ensaio, o que o torna um material adequado para a referida função. As suas características encontram-se sintetizadas na Tabela 6.1, apresentando-se na Figura 6.3 a sua configuração.

Tabela 6.1 Características da unidade de aquecimento

Características da unidade de aquecimento	
<b>Comprimento</b> (mm)	188,5
<b>Diâmetro</b> (mm)	0,15
<b>Relação diâmetro altura</b>	1256,67
<b>Condutividade térmica</b> ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	22,0*
<b>Massa volúmica</b> ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	8,992*

\*segundo Lienhard IV e Lienhard V (2008)

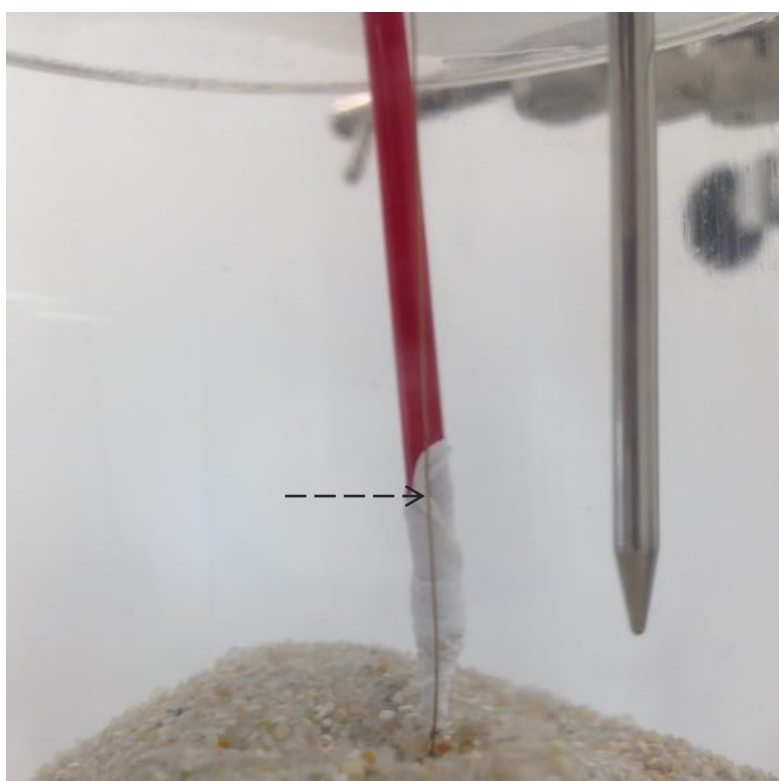


Figura 6.3 Unidade de aquecimento utilizada

### 6.2.2.2 Termopar

Os termopares possibilitam a medição de temperaturas de forma rápida e com precisão considerável. As suas bases teóricas foram propostas em 1821 por Seebeck. Os dispositivos deste tipo permitem uma resolução adequada e um tempo de resposta rápido às variações de temperatura. São compostos geralmente por dois fios de metais ou ligas metálicas distintas. As suas extremidades são ligadas tal como se ilustra na Figura 6.4.

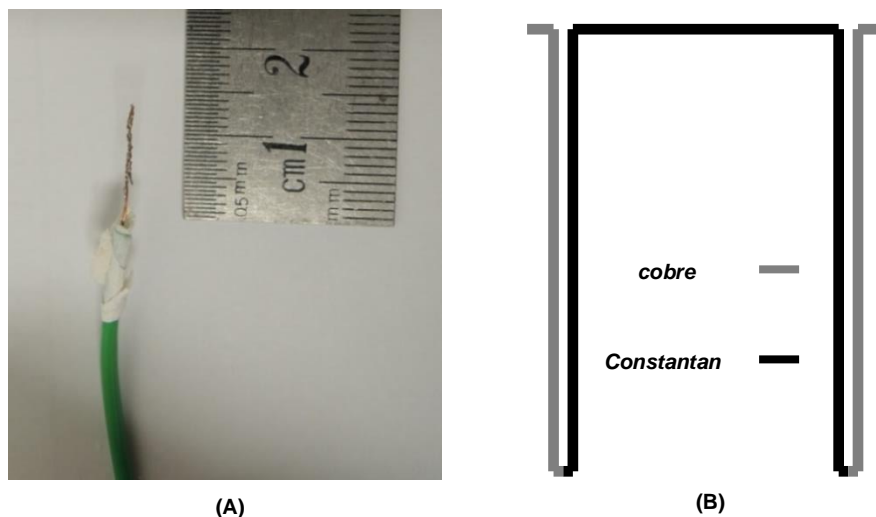


Figura 6.4 (A) Pormenor de uma das uniões do termopar e (B) esquema do termopar utilizado

Uma daquelas ligações é considerada a referência e a outra é utilizada para a medição das temperaturas durante o ensaio. A primeira é inserida no interior de gelo fundente, colocado num calorímetro (Figura 6.5), sendo assim garantida a temperatura de referência de 0°C. A outra ligação é introduzida no interior do provete, sensivelmente a meio, o mais próximo possível da fonte de calor. A diferença de temperatura existente entre a ligação de referência e a ligação de medição gera uma diferença de potencial que é depois transformada em temperatura, mediante uma equação de calibração. Este fenómeno é designado como efeito *Seebeck*.



Figura 6.5 Calorímetro utilizado para colocação da referência em gelo fundente

Os termopares podem ser de vários tipos. Neste trabalho optou-se pela utilização do tipo *T*. Este é composto por dois fios de cobre e um de Constantan, unidos por enrolamento compacto. Permitem medições entre  $-270^{\circ}\text{C}$  e  $400^{\circ}\text{C}$ , sendo o seu termo-elemento positivo o cobre, e negativo o Constantan. A força electromotriz produzida varia entre os  $-6\text{mV}$  e os  $20\text{mV}$ . A leitura da diferença de potencial é realizada utilizando um voltímetro (voltímetro 2) e um circuito electrónico para amplificação da diferença de potencial medida.

### **6.2.2.3 Câmara de ensaio**

Câmara de ensaio é a designação atribuída ao recipiente no interior do qual são colocados os materiais (solos) a ensaiar. Este componente do dispositivo influencia de forma relevante os resultados obtidos, pois constitui a fronteira entre o material a ensaiar e o ambiente exterior. No caso de fronteiras dissipativas, o calor gerado pela unidade de aquecimento propaga-se através do material em ensaio e ao chegar à parede da câmara é conduzido para o exterior que idealmente deve estar a temperatura constante, funcionando assim como dissipador de calor. Já no caso de fronteiras pouco condutoras, a dissipação é menor, sendo difícil a transmissão de calor entre o solo e o exterior. É ainda importante que a câmara de ensaio seja capaz de garantir um fluxo radial de calor, devendo ser minimizado o fluxo axial através da selagem da base e do topo com materiais pouco condutores.

Por forma a analisar as condições de fronteira no decurso dos ensaios e a sua influência nos resultados finais, foram utilizados dois tipos de câmaras, uma em acrílico, fornecida pelo LNEC, e outra em aço inox desenvolvida e construída pelo autor.

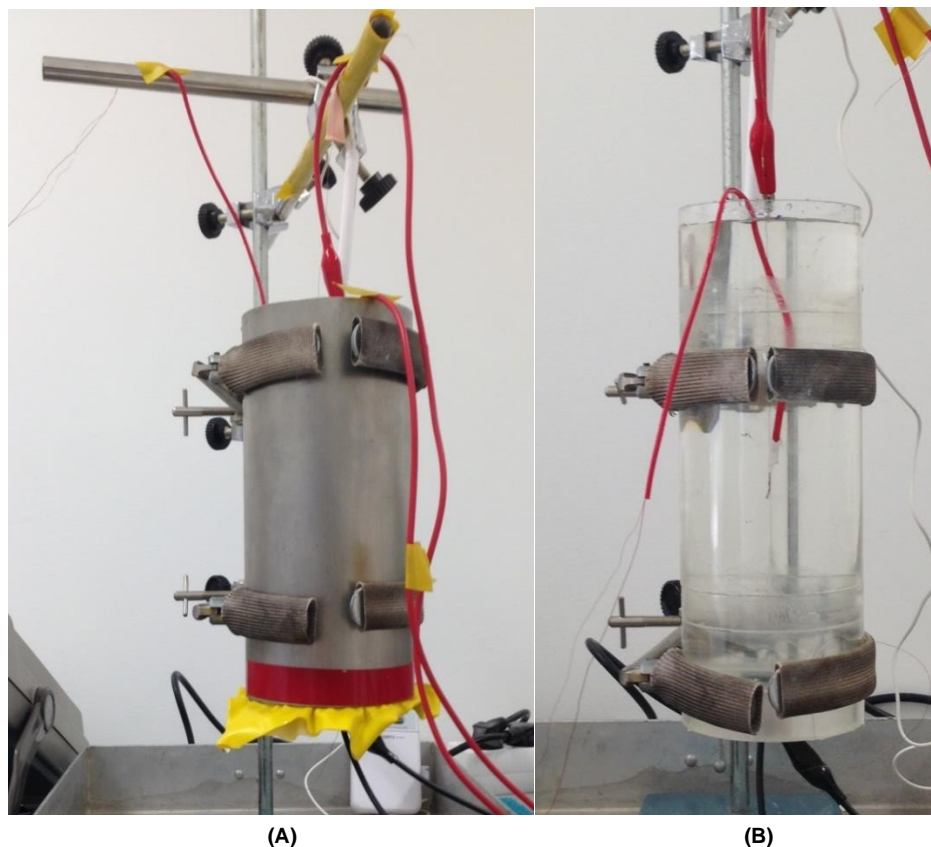


Figura 6.6 (A) Câmara de ensaio aço inoxidável e (B) câmara de ensaio acrílico

Em ambos os casos a base e o topo do cilindro foram seladas com materiais pouco condutores. Para o acrílico recorreu-se ao mesmo material utilizado na restante câmara e para o amostrador em aço inox foi empregue borracha sintética. Na Tabela 6.2 apresentam-se as características de forma de ambos os recipientes. As características térmicas, designadamente o calor específico e condutividade térmica, sintetizam-se na Tabela 6.3.

Tabela 6.2 Dimensões, volume e massa das câmaras de ensaio utilizadas

Características das Câmaras de Ensaio		
Material	Aço inoxidável	Acrílico
Altura (mm)	188,5	240,0
Diâmetro interno (mm)	84,3	75,0
Espessura da parede (mm)	2,3	5,0
Relação diâmetro altura	0,447	0,313
Volume (m <sup>3</sup> )	1,07·10 <sup>-3</sup>	1,06·10 <sup>-3</sup>
Massa (kg)	1078,0	348,8

Tabela 6.3 Propriedades térmicas das câmaras de ensaio segundo Lienhard IV e Lienhard V (2008)

Câmara de Ensaio			
Aço inoxidável		Acrílico	
$\lambda$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$c$ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$c$ (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
13,8–25,0	400 – 460	0,17	1470

Após a colocação do solo na câmara e realizadas as ligações necessárias é fundamental proceder a uma inspeção visual antes do início do ensaio, por forma a identificar possíveis fugas de fluidos pelas juntas das peças utilizadas. Essas fugas, ao ocorrerem junto às ligações da fonte de calor com os fios provenientes da fonte de energia, provocam oscilações, por vezes problemáticas, da diferença de potencial e intensidade de corrente. No caso em estudo, tanto nos ensaios realizados no amostrador de aço como no de acrílico, foi utilizada vaselina para a impermeabilização das juntas das peças, bem como da borracha utilizada para vedar o orifício de passagem do fio de Constantan.

### 6.3. Caracterização térmica: procedimento e resultados obtidos

Os trabalhos laboratoriais visando a caracterização do solo, foram divididos em quatro etapas, doravante designadas por etapa I, II, III e IV. Na primeira procedeu-se à calibração do termopar, por forma a obter a recta de calibração do dispositivo. Na segunda, foi estudado um material com condutividade térmica conhecida objectivando a comparação dos resultados obtidos experimentalmente com outros disponíveis na bibliografia. Na etapa III caracterizou-se e identificou-se o solo do ponto de vista geotécnico e, por fim, na etapa IV, procedeu-se à sua caracterização térmica pelo *Hot Wire Method*.

#### 6.3.1. Etapa I-calibração do termopar

A calibração do dispositivo permite obter a equação para determinação da temperatura em função da diferença de potencial. Inicia-se com a introdução da junção de referência no interior do gelo fundente. A extremidade de leitura é introduzida num banho térmico, o mais perto possível do sensor de temperatura. No início do processo este deve apresentar temperatura inferior à ambiente, sendo depois fixada nos 95°C. Durante o período de aquecimento, a diferença de potencial e a temperatura, são medidas sucessivamente até se atingir os 95°C. Com base nas leituras realizadas é determinada a recta de calibração do termopar.

No caso em estudo, foi utilizado como já referido um termopar tipo T. A recta de calibração foi obtida com base no procedimento acima descrito e apresenta-se ilustrada na Figura 6.7. O ajuste dos pontos a uma recta, obtido por regressão linear simples, apresenta um bom coeficiente de determinação com os pontos determinados experimentalmente (0.9996).

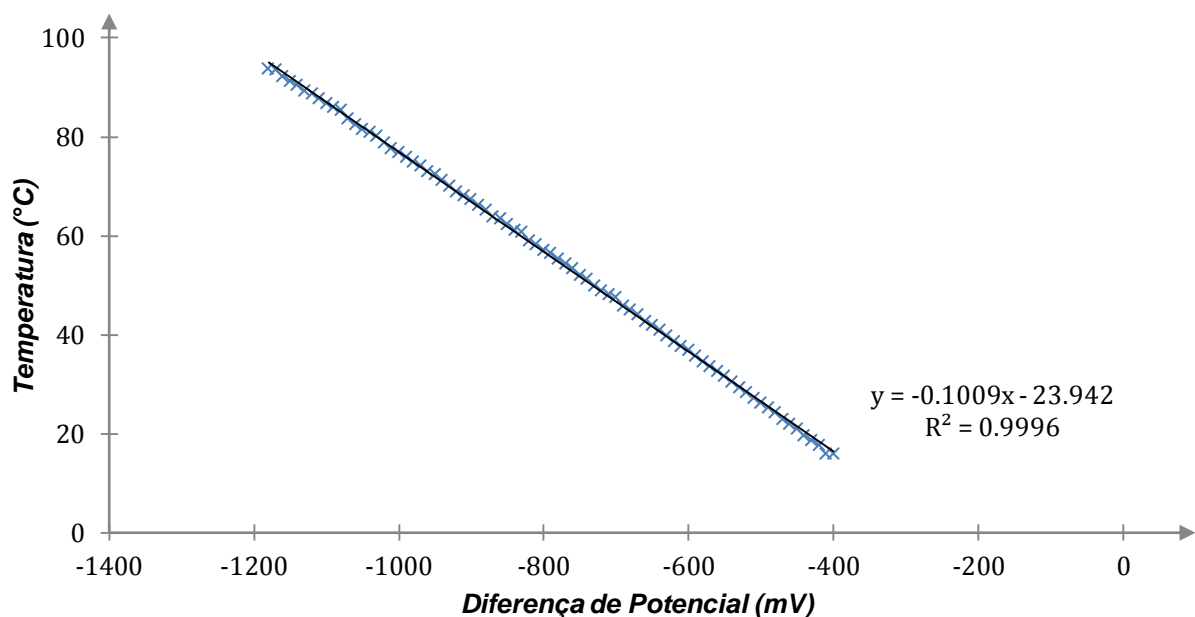


Figura 6.7 Recta de Calibração do Termopar T utilizado

A recta de calibração é então dada pela equação (6.9), sendo esta a expressão utilizada para determinação da temperatura do provete,  $T$ , em função da diferença de potencial,  $U$ , lida no instante  $t$ .

$$T(U) = -0,1009 \cdot U + 23,942 \quad (6.9)$$

Após a obtenção destes resultados, tornou-se então possível a realização de ensaios conducentes à determinação da condutividade térmica, para o espectro de temperaturas de calibração.

### 6.3.2. Etapa II- Caracterização com um Material de Referência

Durante esta fase procurou-se avaliar a qualidade dos resultados obtidos tendo como base um material termicamente bem caracterizado. Utilizou-se a glicerina pura, pois além de cumprir a condição anterior, por ser um líquido com viscosidade, minimiza os efeitos de convecção provocados pelas diferenças de temperaturas impostas pela unidade de aquecimento.

Nos ensaios recorreu-se aos dois amostradores disponíveis já referidos anteriormente. A condutividade térmica da glicerina, tal como a de outros materiais varia com a temperatura. O teor em água é outro dos factores que pode, de algum modo, definir o valor daquela propriedade térmica. Na Figura 6.8 é possível observar a variação da condutividade térmica com o teor em água para diferentes temperaturas de ensaio. As curvas apresentadas tem por base as tabelas da *Glycerine Producers Association* (1963), onde se explicitam os valores de condutividade térmica para soluções aquosas de glicerol, com diferentes teores em água e para diferentes temperaturas.

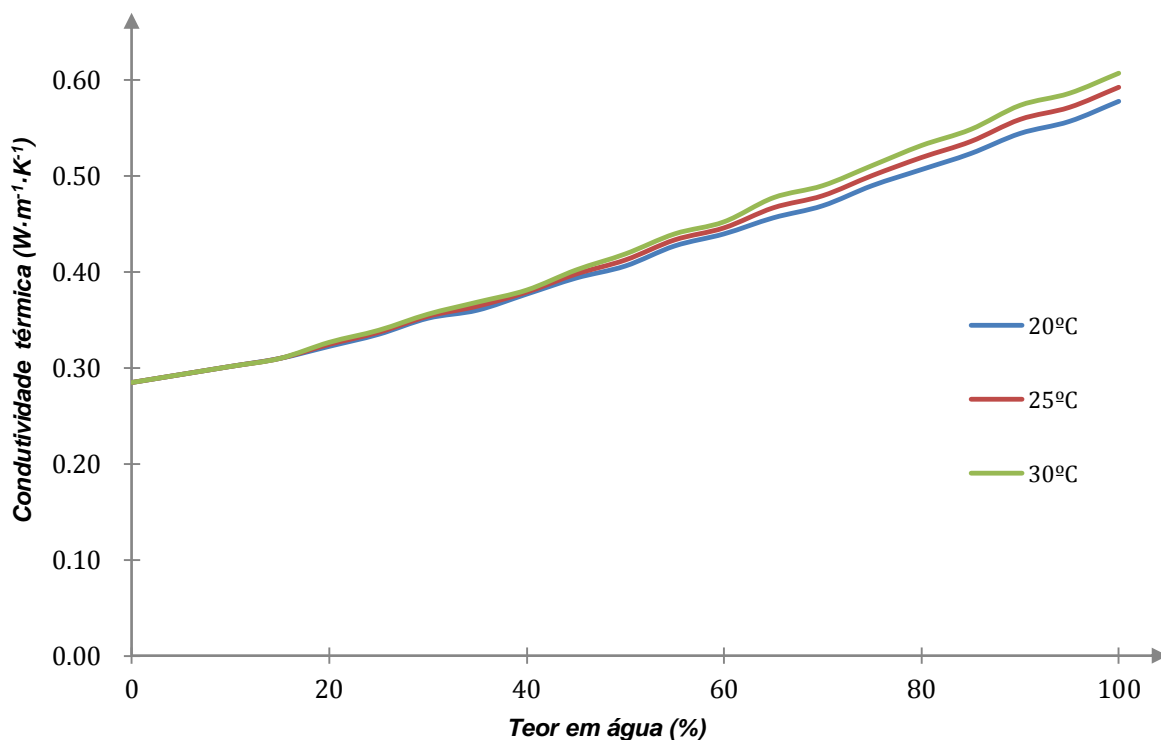


Figura 6.8 Variação da condutividade térmica da glicerina pura com o teor em água para três temperaturas de ensaio distintas



Com base nas curvas apresentadas é possível concluir que para valores reduzidos de teor em água a temperatura ambiente influência pouco o valor de condutividade térmica. A glicerina pura refere-se a todas as soluções aquosas de glicerol cujo teor em água varia entre 0%-5%. Em virtude da glicerina estudada não apresentar explicação acerca da sua composição, mas referir ser pura (Figura 6.9 (B)), considerou-se um intervalo com limites correspondentes à condutividade térmica para 0% e 5% de teor em água. Assim, segundo a *Glycerine Producers Association* (1963) a condutividade térmica da glicerina é igual a  $0,284\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  e  $0,301\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  para 0% e 5% de teor em água, respectivamente. Desta forma, o resultado esperado para as medições realizadas deverá situar-se entre aqueles dois valores.

Os ensaios foram realizados durante dez minutos, ao contrário do aconteceu no caso dos solos, onde se utilizaram tempos de medidas muito superiores. Esta redução foi justificada pelo facto de se ter verificado que após sensivelmente 150s de ensaio já havia sido atingido um valor relativamente constante de diferença de temperatura.

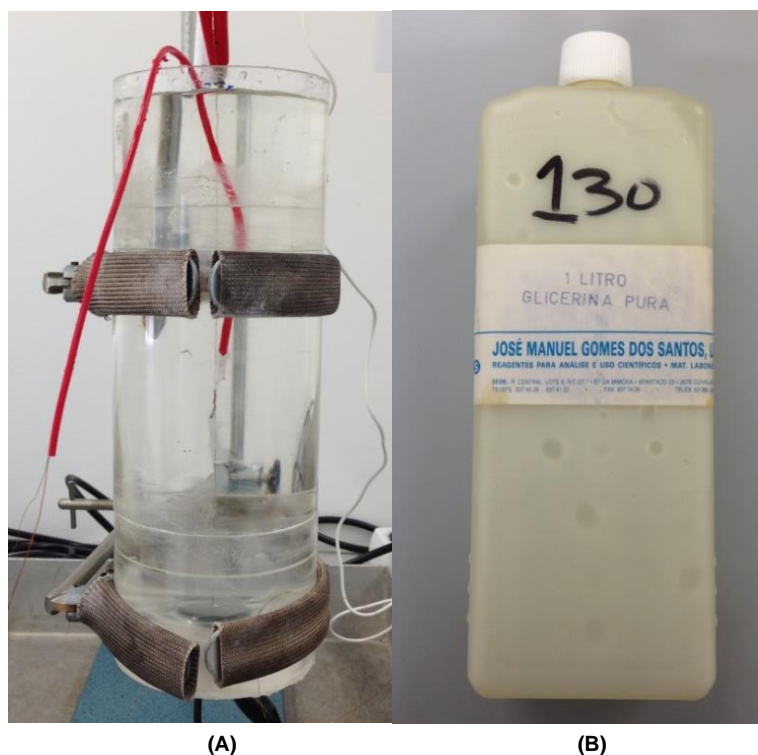


Figura 6.9 (A) Câmara de ensaio e (B) recipiente com rótulo da glicerina ensaiada

Na Tabela 6.4 apresentam-se os resultados obtidos experimentalmente para a condutividade térmica da glicerina. São ainda sintetizados os de coeficientes de determinação ( $R^2$ ) para os ajustes por regressão linear e as incertezas associadas às medições ( $\delta$ ). Na Tabela 6.5 são expostas as informações relativas à intensidade de corrente ( $I$ ), diferença de potencial ( $U$ ) e potência ( $P$ ) utilizadas. Nas Figuras 6.10 e 6.11 ilustram-se os resultados gráficos obtidos durante o ensaio número oito, realizado na câmara de ensaio de aço inox.



Tabela 6.4 Valores lidos de diferença de potencial e intensidade de corrente e a respectiva potência obtida analiticamente

Câmara de Ensaio	Ensaio	$U$ (V)	$\delta(U)$ (V)	$I$ (mA)	$\delta(I)$ (A)	$P$ (W)	$\delta(P)$ (W)
Acrílico	1	1,54	$\pm 0,01$	201	$\pm 0,001$	0,31	$\pm 0,03$
	2	1,55		203		0,31	
	3	2,09		273		0,57	
	4	2,76		360		0,99	
Aço	5	2,57		389		1,00	
	6	2,60		390		1,01	
	7	3,00		461		1,38	
	8	2,02		456		0,92	

Tabela 6.5 Condutividade térmicas obtidas para os diferentes ensaios realizados em ambas as câmaras

Câmara de Ensaio	Ensaio	Transiente Térmico (s)	$\lambda$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$R^2$	$\lambda_{méd}$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$\delta(\lambda_{méd})$ (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )
Acrílico	1	20-120	0,333	0,928	0,305	$\pm 0,04^*$
	2	20-120	0,344	0,909		
	3	25-120	0,283	0,930		
	4	35-120	0,260	0,992		
Aço	5	38-94	0,339	0,991	0,314	$\pm 0,02^*$
	6	40-80	0,314	0,991		
	7	42-72	0,306	0,992		
	8	46-70	0,298	0,993		

\*corresponde ao desvio padrão arredondado às centésimas

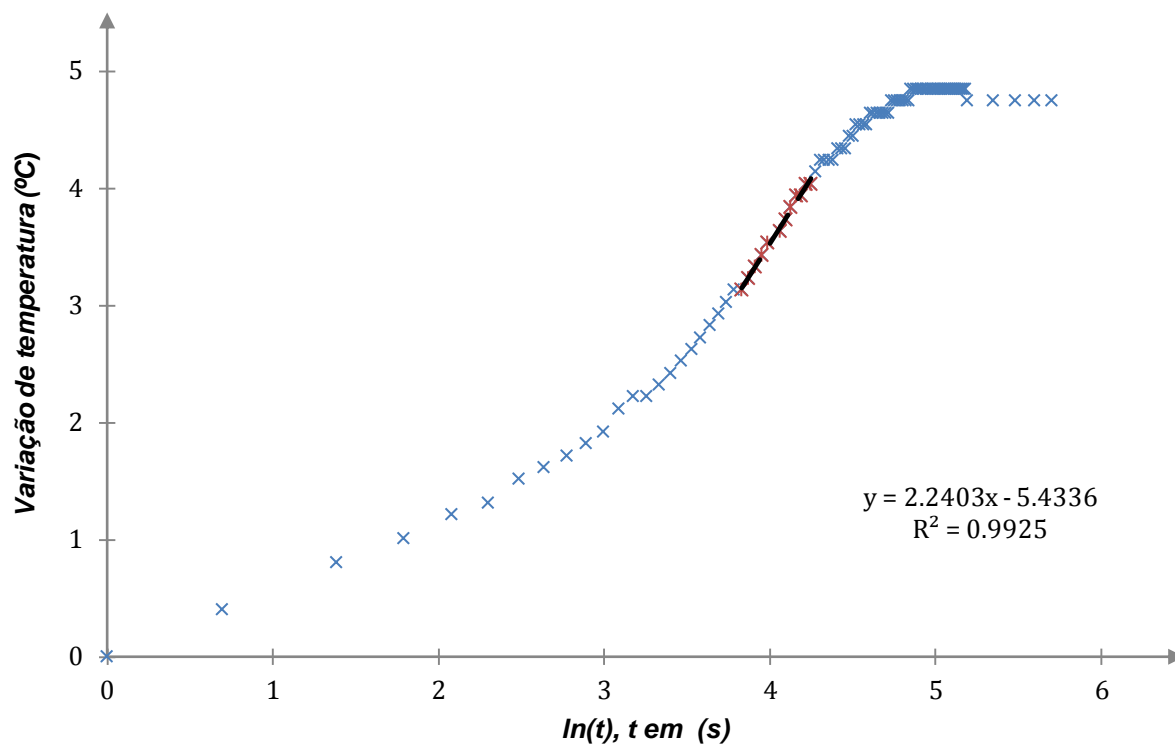


Figura 6.10 Variação de temperatura para o ensaio nº8 realizado na câmara de ensaio em inox

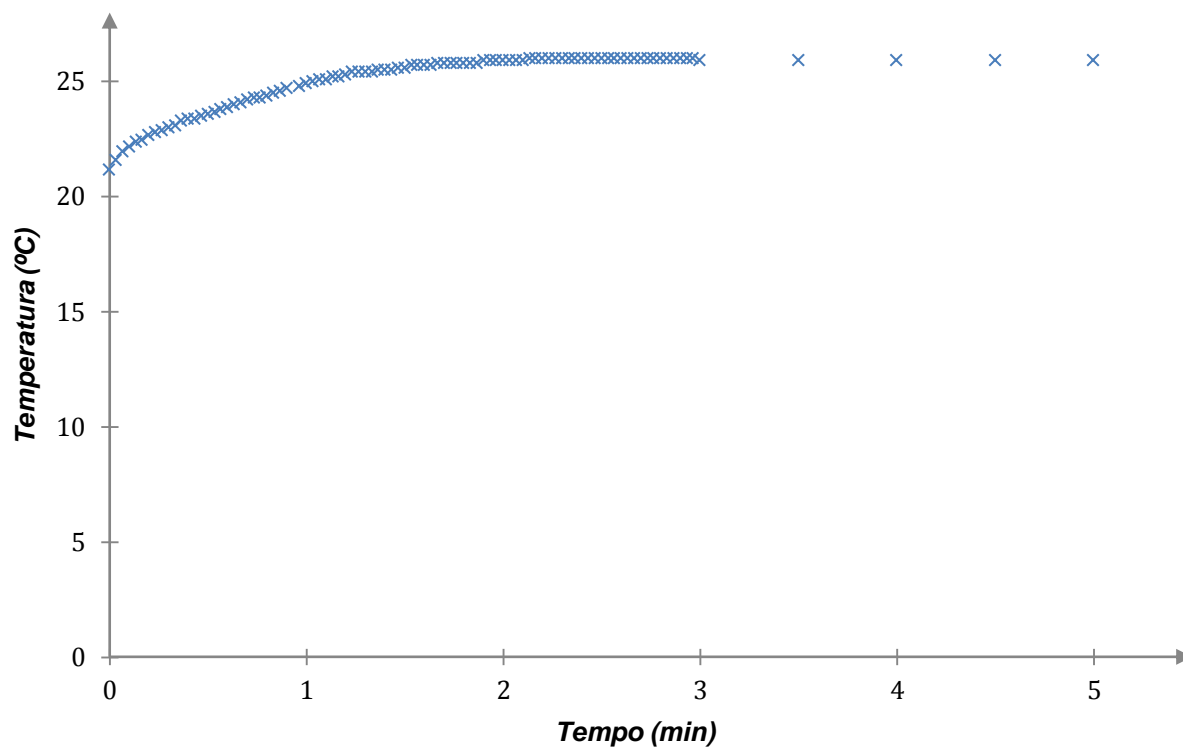


Figura 6.11 Evolução da temperatura durante o ensaio nº8 realizado na câmara de aço inox

A condutividade determinada experimentalmente corresponde ao valor médio das condutividades obtidas em cada um dos ensaios realizados arredondado às centésimas. Para cada um dos valores médios obtidos, foi ainda determinado o respectivo desvio padrão e incerteza associada. Assim, a condutividade térmica da glicerina determinada com recurso às câmaras de acrílico e aço é de  $0,31\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Apesar dos valores iguais quando arredondados, há que referir que as incertezas associadas são distintas. No caso da câmara acrílica obteve-se uma incerteza no valor medido de condutividade de  $\pm 0,04\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , por outro lado, o resultado obtido com base em ensaios executados na câmara de aço inox apresenta um valor de incerteza de  $\pm 0,02\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ . Pode assim concluir-se, tendo em consideração a incerteza dos resultados, que os valores obtidos experimentalmente através dos dispositivos de ensaio são concordantes com os valores bibliográficos já apresentados, verificando-se porém uma precisão superior nos resultados obtidos na câmara de aço.

Ainda que os resultados se apresentem razoáveis, há que atentar ao facto de poderem existir fontes de erro associadas tanto ao dispositivo como ao manuseamento do material a ensaiar. O glicerol constitui um material fortemente higroscópico, o que significa que é capaz de absorver quantidades consideráveis de água que possam existir na atmosfera. Durante o manuseamento e execução do ensaio, a glicerina esteve exposta às condições ambiente de laboratório, podendo durante esse período ter sido absorvida alguma quantidade de água. Tal facto pode ter induzido variação na condutividade térmica.

A actuação conjunta de mecanismos de transferência de calor é outro dos factores que eventualmente pode ter potenciado alguns erros nos resultados obtidos. Por ser um líquido, ainda que com viscosidade superior à da água, a possibilidade de existir convecção é uma realidade, apesar de a olho nú não ter sido observável. A sua ocorrência resulta na actuação combinada de dois mecanismos de transferência de calor diferentes: a condução e a convecção. Por isto, facilmente se compreenderá que a transferência de calor será maior quando existe actuação concomitante dos referidos mecanismos, levando a um aumento na quantidade total de energia transferida. Ao ser desprezado por parte do HWM o efeito da convecção, o aumento da quantidade de energia transferida será, erradamente, reflectido no valor de condutividade térmica.

No que se refere ao procedimento e dispositivo de ensaio existem alguns pormenores que devem ser também considerados como possíveis fontes de erros. A câmara de ensaio é um dos factores que pode determinar a qualidade dos resultados obtidos. Teoricamente, as suas dimensões são suficientes para que exista uma aproximação ao LSM, porém constitui sempre um elemento finito. O sistema de medição é outro dos componentes que pode influenciar negativamente os resultados. A referência em gelo fundente não é a solução mais adequada por não garantir com fiabilidade um valor de temperatura de referência de  $0^{\circ}\text{C}$ . A sensibilidade deve ser também levada em conta. Durante os ensaios, apenas se conseguiram resoluções de  $0,1^{\circ}\text{C}$ , o que resulta em alguns casos no aparecimento de patamares nos gráficos  $\Delta T$  em função de  $\ln(t)$ . Estes originam dificuldades no ajuste da recta de regressão e consequentemente transferem algum erro para o declive utilizado na determinação da condutividade térmica. Por fim, é importante atentar à influência de campos electromagnéticos gerados por dispositivos electrónicos como telemóveis ou computadores. Estes

podem provocar oscilações mesuráveis no voltímetro que monitoriza a diferença de potencial no termopar, sendo por isso necessário evitar a presença destes nas imediações da zona de ensaio.

Não obstante o exposto anteriormente é possível afirmar que o dispositivo montado fornece resultados razoáveis, que se aproximam dos resultados bibliográficos. No entanto, os valores por ele fornecidos devem ser utilizados com as devidas precauções, não sendo razoável considerar estas medições como absolutas.

### 6.3.3. Etapa III-caracterização geotécnica do solo

A caracterização geotécnica do solo permitiu, em primeira análise, realizar a sua classificação e obter conhecimento acerca das propriedades. As propriedades térmicas dos solos, e em particular a condutividade térmica, dependem fortemente de propriedades intrínsecas destes materiais, tais como a dimensão das partículas e sua forma, a mineralogia e o peso volúmico. Tendo como objectivo a obtenção de algumas propriedades geotécnicas, foram realizados alguns ensaios, que se apresentam na Tabela 6.6. O peso volúmico do solo, bem como a sua porosidade, índice de vazios e teor em água serão apresentados apenas na secção seguinte. Estes índices físicos variam consoante o ensaio, sendo desta forma lógico que sejam apresentados juntamente a cada um deles. A determinação do peso volúmico, não foi realizada através de procedimento normalizado, devido às dificuldades em controlar as condições de colocação do solo no interior da câmara. Por forma a minimizar este problema, optou-se por realizar ensaios com volume de areia constante.

Tabela 6.6 Tipo de ensaios realizados

Ensaio		Norma
Granulometria	Via seca	LNEC E 239
	Via húmida	LNEC E 196
Densidade das partículas sólidas		NP 83 - 1965
Teor em água		NP 84 - 1965

Através da observação à lupa binocular, marca Olympus modelo SZ-40, com possibilidade de ampliação entre 0,7X-4,0X, a amostra revelou ser uma areia branca, fina a média, com classe de arredondamento entre o sub-arredondado a arredondado (segundo Pettijohn (1948)). É essencialmente constituída por quartzo translúcido a transparente, 75% a 80%, contendo ainda 2% a 5% de grãos de quartzo leitoso e cerca de 15% de grãos de feldspato. Além destas mineralogias, identificaram-se, também, em quantidades diminutas - até cerca de 1%- grãos de moscovite e minerais ferromagnesianos (anfíbolos e/ou piroxenas). Na Figura 6.12 apresenta-se a areia estudada, onde é possível observar a forma dos grãos, os diferentes constituintes e a sua dimensão.

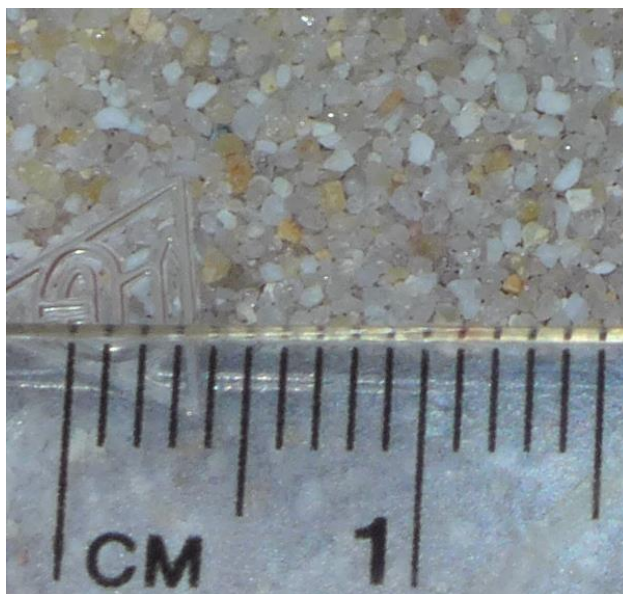


Figura 6.12 Pormenor dos grãos constituintes da areia ensaiada

Determinou-se também a curva granulometrica do solo (Figura 6.13) por forma a realizar a sua classificação. Através da sua análise conclui-se que o solo estudado apresenta granulometria uniforme, dizendo-se por isso mal graduado.

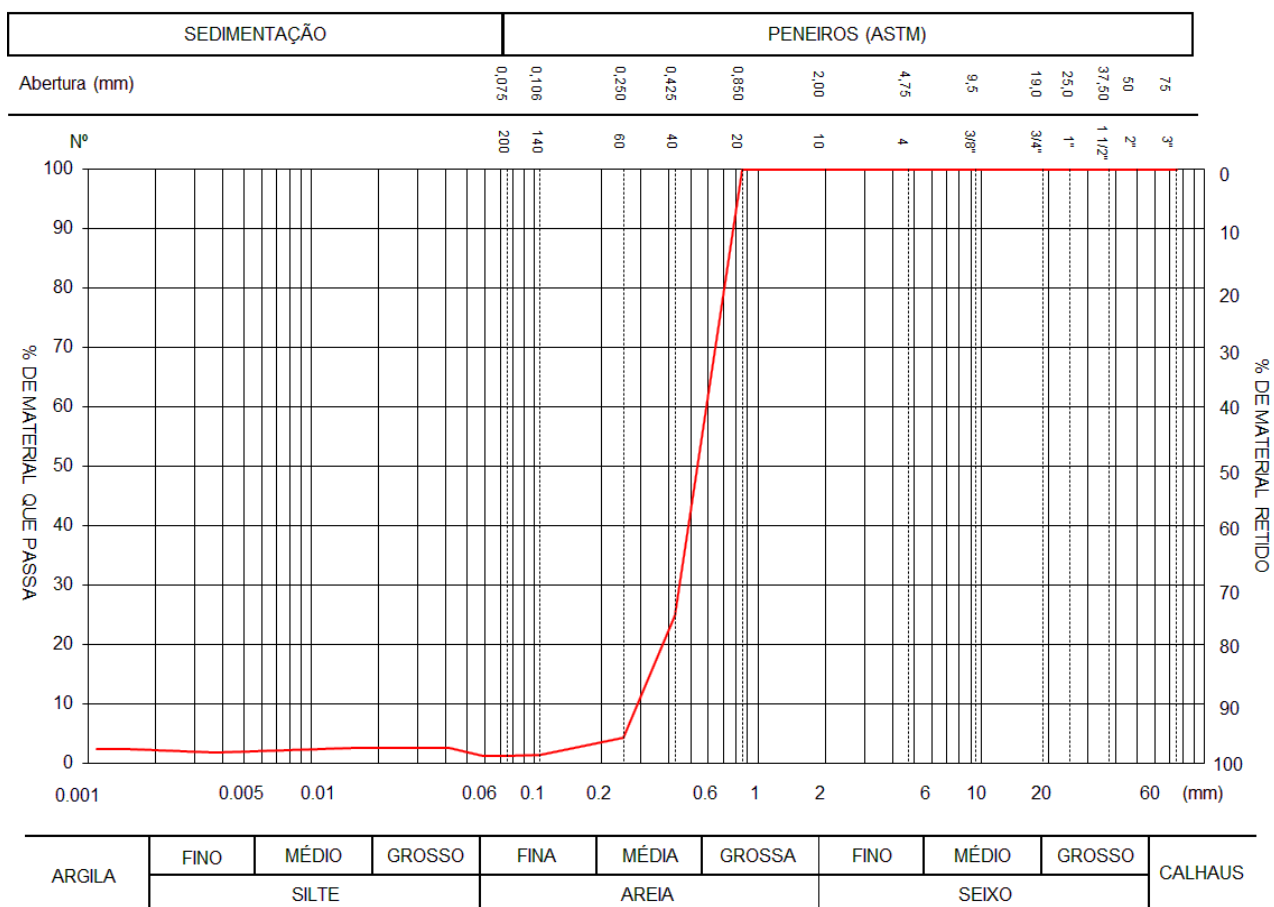


Figura 6.13 Curva granulométrica do solo estudado

Os coeficientes de uniformidade ( $C_u$ ) e curvatura ( $C_c$ ) apresentados na Tabela 6.7, confirmam a fraca graduação do solo e a uniformidade na dimensão dos grãos. Quanto à dimensão das partículas, o solo é maioritariamente constituído pela dimensão das areias, 98,3%, apresentando uma percentagem de finos, correspondente à massa que passa o peneiro nº200, de 1,3%.

**Tabela 6.7 Coeficientes de curvatura e uniformidade do solo**

Coeficiente	Valor
$C_c$	1,170
$C_u$	2,030

Quanto à densidade das partículas constituintes da fracção sólida, esta foi determinada segundo a norma referida anteriormente. Obteve-se então um valor de  $G_s=2,63$  para este índice.

Com recurso à Classificação Unificada de Solo (USC), da *American Association for State Highway and Transportation Officials*, AASHTO o solo ensaiado é classificado como areia mal graduada SP. Com base na classificação é possível concluir que estes materiais apresentam elevada condutividade hidráulica.

#### **6.3.4. Etapa IV-caracterização térmica do solo**

A caracterização térmica realizou-se de acordo com um procedimento que se tentou manter uniforme entre os diversos ensaios. O volume de areia a ensaiar em cada dia foi previamente seco na estufa durante 24h, por forma a garantir um teor em água de 0%. Após este período foi deixada no exsiccador até atingir a temperatura ambiente. Os ensaios foram executados para teores em água de 0%, 5%, 10% e 15%. Em primeiro lugar o solo foi estudado no seu estado seco, tendo para esse efeito sido realizados três ensaios. Em condições de teor em água diferente de zero, os ensaios realizaram-se para cada provete uma única vez, à excepção do caso estudado com teor em água de 10%, que foi realizado duas vezes.

A técnica de colocação da areia no interior da câmara diferiu em função do teor em água do solo. No caso dos provetes secos utilizou-se um funil de vidro, tal como se ilustra na Figura 6.14. Durante o preenchimento foram imprimidas ao solo pequenas vibrações por forma a reduzir o seu índice de vazios. Esta solução revelou-se simples não apresentando problemas significativos de execução. Nos solos húmidos, tanto a utilização do funil como a imposição de vibração ao provete revelou-se inviável, tendo por isso sido adoptada outra metodologia. O material introduziu-se no interior da câmara de ensaio com recurso a espátulas, tendo a compactação sido realizada por fases, utilizando o pilão do almofariz. Tentou garantir-se uma certa homogeneidade no grau de compactação, porém esta não é uma condição que se possa garantir que tenha sido conseguida.

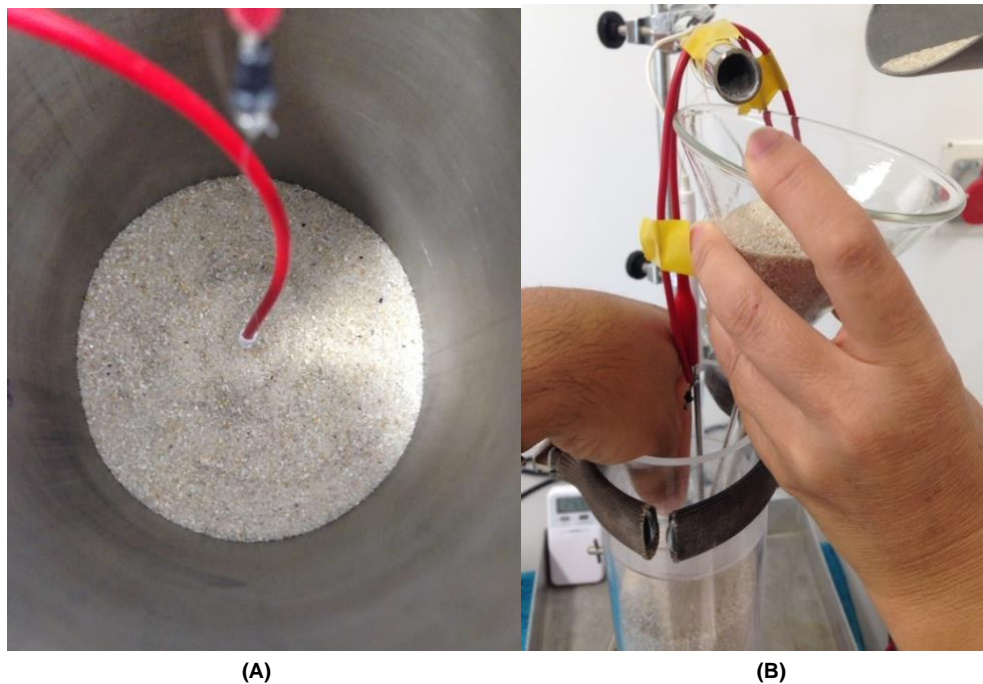


Figura 6.14 (A) Câmara de ensaio parcialmente preenchida com areia e (B) colocação da areia seca

O termopar foi introduzido no solo ainda durante o preenchimento, quando metade do volume da câmara se encontrava preenchido. Após a fixação da junção de medição no local adequado, o restante volume foi preenchido com especial cuidado para que não existisse mudança de posição da junção de medição, como consequência da operação de preenchimento. No final, a câmara apresentava o aspecto patenteado na Figura 6.15 (A), onde também é visível o contacto que faz a ligação entre uma das extremidades da unidade de aquecimento e a fonte de energia (Figura 6.15 (B)).



Figura 6.15 (A) Câmara de ensaio totalmente preenchida e (B) pormenor do contacto entre o fio proveniente da fonte de energia e o fio de constantan (unidade de aquecimento)

A câmara foi então selada com borracha sintética pouco condutora, sendo posteriormente inserido no orifício apropriado o termómetro para monitorização da temperatura na fronteira.

Os ensaios decorreram durante o intervalo de tempo mínimo estabelecido de 3600s (1h), tendo em três deles sido necessário obter medições durante períodos superiores. Estas situações ocorreram em solos húmidos, devido a uma mudança de comportamento verificada nos gráficos  $\Delta T$  em função do  $\ln(t)$  que até aqui não se havia observada. O aumento do tempo de medição permitiu identificar de forma mais marcada a referida mudança, e assim compreender o seu significado.

Para cada ensaio realizado calculou-se o teor em água após o período de medição e o peso volumico. O primeiro obteve-se com recurso à norma já referida e o segundo através da seguinte expressão:

$$\gamma_h = \frac{W_t - W_c}{V_c} \cdot 9,81 \quad (6.10)$$

em que  $W_t$  é a massa do conjunto câmara de ensaio- solo e  $W_c$  e  $V_c$  são respectivamente a massa e volume útil da câmara.

Com base nos valores de densidade das partículas sólidas e peso volumico, foi calculada a porosidade  $n$  e índice de vazios  $e$ . No caso dos solos húmidos, foi ainda determinado o peso volumico seco correspondente ( $\gamma_d$ ). As potências utilizadas nos ensaios e os resultados obtidos apresentam-se nas Tabelas 6.8 e 6.9, respectivamente. Os gráficos de variação e evolução de temperatura ilustram-se nas Figuras 6.16 e 6.17.

**Tabela 6.8 Valores lidos de diferença de potencial e intensidade de corrente e a respectiva potência obtida analiticamente para os ensaios em solo seco**

Câmara de Ensaio	Ensaio	$U$ (V)	$\delta(U)$ (V)	$I$ (mA)	$\delta(I)$ (A)	$P$ (W)	$\delta(P)$ (W)
Aço	1	2,75	$\pm 0,01$	399	$\pm 0,001$	1,10	$\pm 0,03$
	2	3,00		380		1,14	
	3	2,09		365		0,97	

**Tabela 6.9 Resultados obtido para a condutividade térmica do solo seco**

Câmara de Ensaio	Ensaio	$\gamma_d$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$n$ (%)	$e$	Transiente térmico (s)	$\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$R^2$
Aço	1	13,51	48,6	0,94	150 – 720	0,368	0,997
	2	15,94	38,0	0,65	40 – 2460	0,451	0,996
	3	16,24	39,0	0,65	180 – 1500	0,453	0,995



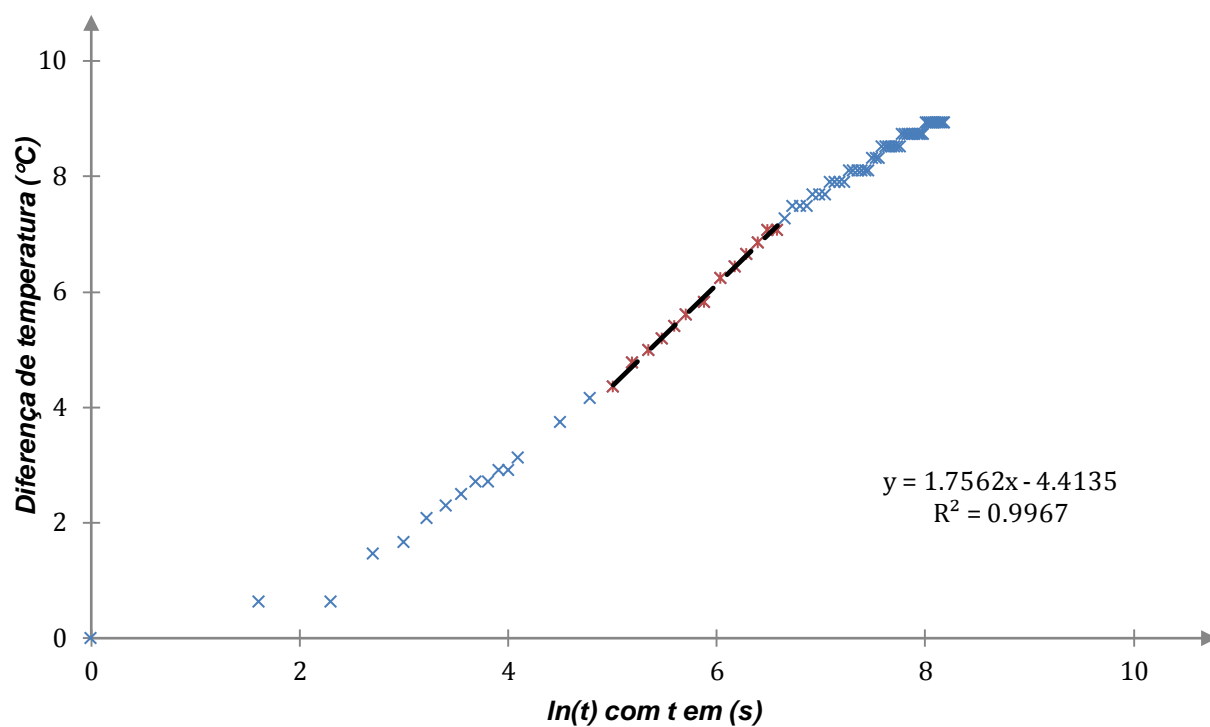


Figura 6.16 Variação de temperatura para o ensaio nº1 (areia seca)

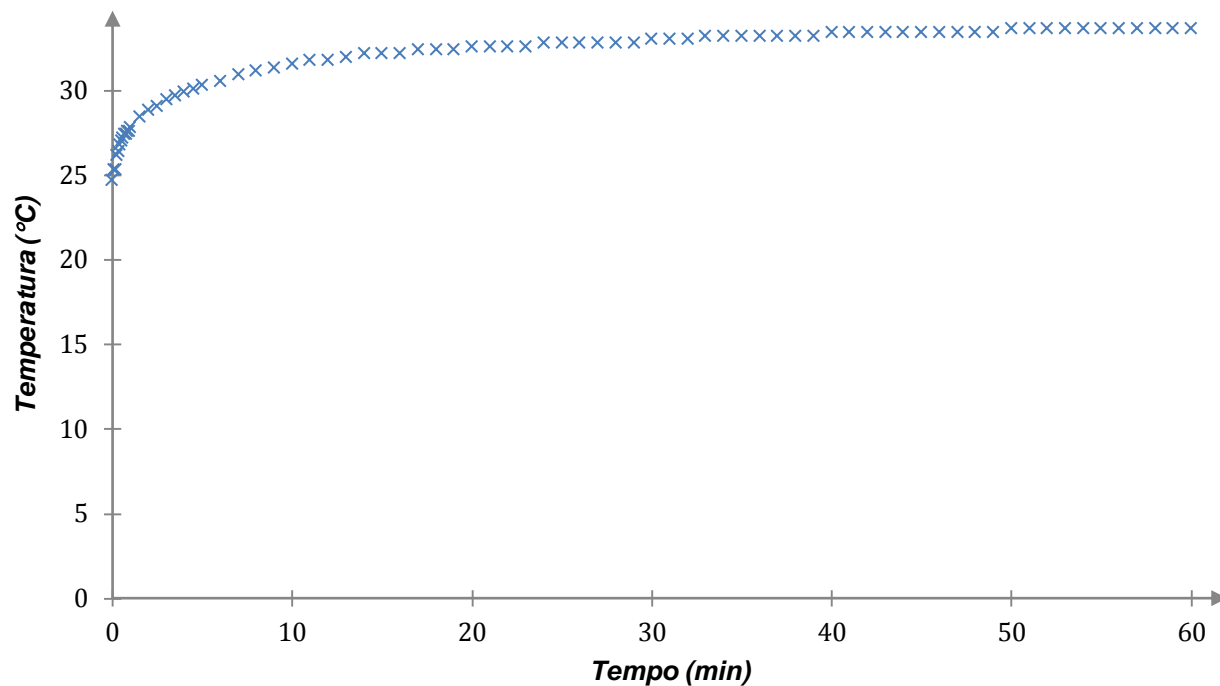


Figura 6.17 Evolução da temperatura durante o ensaio nº1 (areia seca)

Por forma averiguar a plausibilidade destes resultados, recorreu-se a dados existentes na bibliografia, confrontando-os com os valores obtidos experimentalmente. McCorry e Jones (2011), apresenta

valores de condutividade para diferentes tipos de solos e rochas baseados na norma alemã VDI 4640, relativa ao projecto e dimensionamento de GES. Segundo o autor, a condutividade térmica de referência para as areias secas situa-se no intervalo entre  $0,3\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  e  $0,9\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ , valores estes que englobam todos os resultados determinados e apresentados na Tabela 6.9. É ainda possível verificar um aumento da condutividade térmica com o aumento do peso volúmico, que é consistente com a diminuição do volume de vazios preenchidos com ar.

Apresentam-se, por fim, nas Tabelas 6.10 e 6.11 os resultados obtidos para ensaios em areia húmida. Tendo em consideração as elevadas condutividades hidráulicas, e já antecipando problemas relacionados com a migração da água intersticial, optou-se pela realização de ensaios com os teores em água de 5%, 10% e 15%, valores estes relativos ao instante de início do ensaio.

**Tabela 6.10 Valores lidos de diferença de potencial e intensidade de corrente e respectiva potência obtida analiticamente para os ensaios em solo com diferentes teores em água**

Câmara de Ensaio	Ensaio	$U$ (V)	$\delta(U)$ (V)	$I$ (mA)	$\delta(I)$ (A)	$P$ (W)	$\delta(P)$ (W)
Aço	1	2,66	$\pm 0,01$	390	$\pm 0,001$	1,04	$\pm 0,03$
	2	2,67		388		1,04	
	3	2,61		378		0,99	
	4	2,63		382		1,00	

**Tabela 6.11 Resultados obtidos para a condutividade térmica do solo com diferentes teores em água**

Câmara de Ensaio	Ensaio	$\gamma_d$ ( $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$n$ (%)	$e$	$\omega$ (%)	Transiente térmico (s)	$\lambda$ ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	$R^2$
Aço	1	13,19	49,8	0,99	4,8	1020 – 3000	0,519	0,974
	2	12,74	51,6	1,06	9,8	30 – 960	1,625	0,996
	3	12,74	51,6	1,06	9,8	15 – 270	1,649	0,983
	4	13,08	50,3	1,01	17,9	25 – 600	1,268	0,974

Com base nas Tabelas 6.10 e 6.11 facilmente se conclui que os resultados obtidos em solos húmidos são substancialmente piores que os obtidos até aqui. Desde logo se constata uma diminuição generalizada nos coeficientes de determinação dos ajustes por regressão linear. A diminuição da qualidade dos resultados poderá ser consequência de problemas operacionais, nomeadamente associados à migração da água intersticial. Ao existir variação do teor em água nos diferentes pontos

do provete, verifica-se um aumento no grau de heterogeneidade do volume total em análise. Este facto resulta num comportamento térmico não uniforme, o que deteriora os resultados obtidos.

Neste caso existiram algumas dificuldades associadas à selagem do fundo da câmara de ensaio, que em alguns casos apresentou fugas significativas de água. Outra das dificuldades relacionada com adição de água ao solo residiu no facto de não ter sido garantido um teor em água uniforme durante todo o ensaio. Na realidade, verificou-se que existiu em todos os ensaios migração do volume de água para a zona inferior da câmara, em virtude da elevada condutividade hidráulica do solo. Esta já havia sido inferida aquando da classificação do referido material segundo a Classificação Unificada de Solos.

Foi ainda detectada a influência da onda térmica reflectida na parede da câmara de ensaio, facto já registado e explicado por Hammerschmidt e Sabuga (2000) e Presley e Christensen (1997). O solo ao apresentar maior capacidade para transmitir calor dissipará mais energia. Por este facto, a onda térmica provocada no seu interior pelo funcionamento da unidade de aquecimento atingirá mais rapidamente a parede da câmara de ensaio, ou seja, a penetração da onda térmica no solo é mais rápida (maior difusividade térmica). Entre a parede interior e exterior, a transferência será eficaz, porém a troca de energia entre a parede exterior e o ar envolvente será realizada com menos eficiência, ocorrendo por isso um aumento do declive da curva. Esta influência será tanto maior quanto maior for a difusividade térmica do solo. Este facto é visível nas curvas obtidas para os teores em água de 10% e 15%. Nas Figuras 6.18 e 6.19 ilustram-se a título de exemplo os gráficos obtidos para um dos ensaios realizados com teor em água diferente de zero. Na primeira é observável o comportamento díspar relativamente ao observado na Figura 6.16.

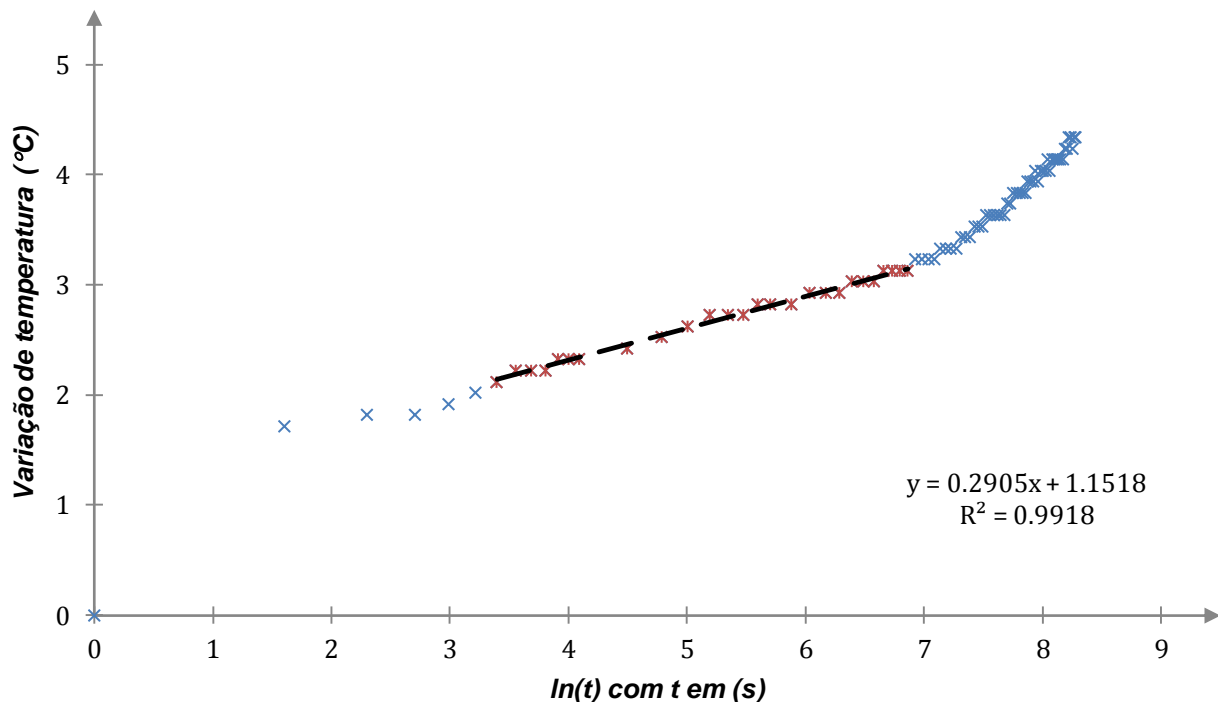


Figura 6.18 Variação de temperatura para o ensaio nº2 (areia húmida  $\omega = 9,8\%$ )

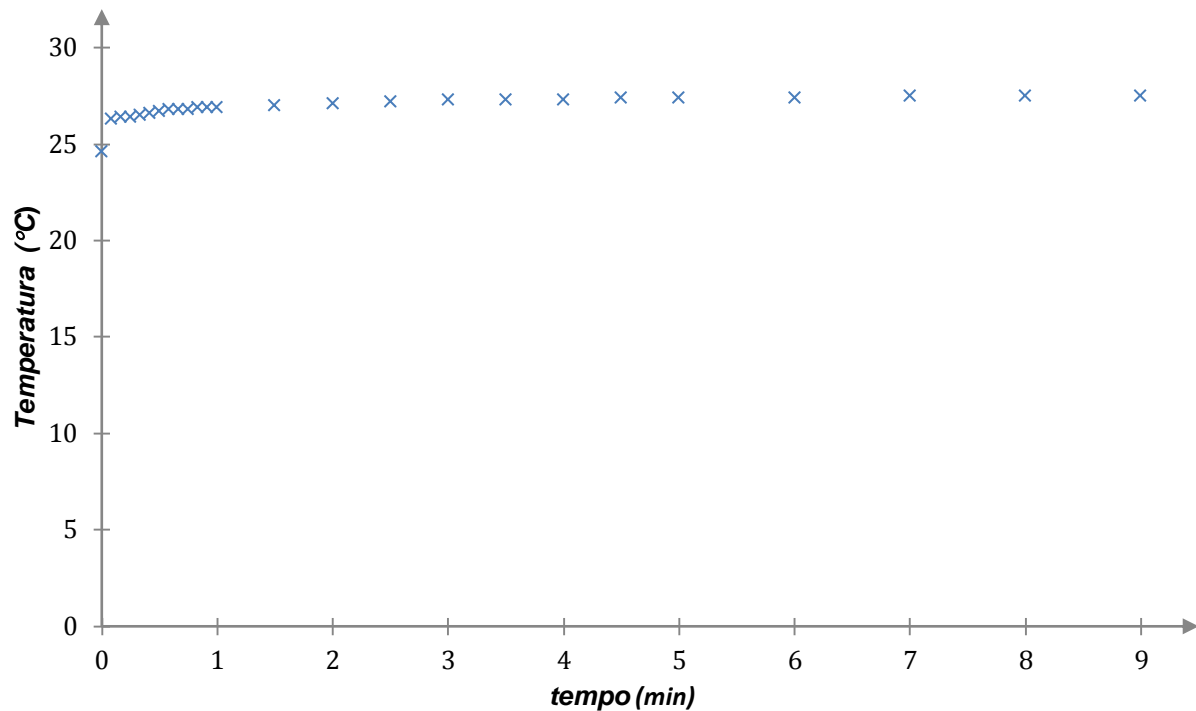


Figura 6.19 Evolução da temperatura durante o ensaio nº2 (areia húmida  $\omega = 9,8\%$ )

Não obstante os pontos anteriormente referidos os resultados apresentam alguma razoabilidade. Se comparados com os dados bibliográficos sugeridos pela norma VDI 4640, conclui-se que os valores de condutividade térmica obtidos nos ensaios 2, 3 e 4 se encontram dentro do intervalo de referência para areias húmidas ( $1,0\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  a  $1,9\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). No entanto há que ressaltar um ponto de incoerência nos resultados. No caso particular do ensaio 4, seria de esperar um aumento na condutividade térmica relativamente aos ensaios com menores teores em água. Tal facto não se verifica, ocorrendo pelo contrário uma diminuição. Assim, há que atentar à possibilidade de terem existido erros experimentais associados a estas determinações, muito provavelmente relacionados com a migração da água intersticial para a zona inferior da câmara de ensaio.

#### 6.4. Apreciação dos resultados

Neste capítulo pretendeu-se caracterizar termicamente um solo, para a obtenção de propriedades necessárias para a realização da modelação numérica de uma estrutura termoactiva. Utilizou-se um dispositivo não calibrado, em virtude de não existir disponibilidade para aquisição de equipamento certificado existente no mercado.

Tendo em vista a viabilidade dos resultados, foram em primeiro lugar realizados ensaios em glicerina, material termicamente bem caracterizado, o que permitiu a confrontação entre os resultados experimentais e os apresentados pela *Glycerine Producers Association* (1963). Os resultados obtidos através do *Hot Wire Method* foram, relativamente à referência, ligeiramente superiores.

Seguiu-se a caracterização geotécnica do solo, pela qual foi possível obter as propriedades geotécnicas mais relevantes na definição do comportamento térmico. Assim, o solo corresponde segundo a USC a uma areia mal graduada, SP, de grãos sub-arredondados a arredondados de igual dimensão, onde prevalece o quartzo e a ortóclase.

Por fim foram realizados ensaios térmicos considerando diferentes teores em humidade. O estudo incidiu primeiro em provetes secos e depois húmidos. Os resultados obtidos para o caso seco são consistentes, inserindo-se nos intervalos de referência. A qualidade dos ajustes obtidos pelo MAR é boa, tendo em qualquer caso sido atingido e superado o valor mínimo de  $R^2$ . A variação da condutividade térmica é coerente com o esperado, ou seja, o incremento no peso volúmico, ainda que involuntário, resultou no aumento desta propriedade térmica. No caso húmido os resultados apresentam pior qualidade. Apesar de se verificar compatibilidade entre os resultados experimentais e os disponíveis na bibliografia, existem alguns pontos de incoerência. Os ajustes realizados pelo MAR foram de pior qualidade, tendo sido atingido em apenas um ensaio o valor mínimo de coeficiente de determinação. O ensaio número quatro revela-se bastante incongruente, pois a diminuição da condutividade térmica não se verifica quando se aumenta o teor em água e muito menos quando associado a este aumento, ocorre também diminuição da porosidade. Os ensaios dois e três são também duvidosos pois, ao serem realizados nas mesmas condições, seria de esperar valores semelhantes. Todavia observam-se variações nos resultados da ordem da centésima. Este facto é ainda mais estranho quando comparado com os resultados obtidos no estado seco, onde nos ensaios dois e três, para condições muito similares, se obtiveram resultados sensivelmente iguais, variando apenas na ordem da milésima.

Desta forma, torna-se evidente que os ensaios realizados em condições de teor em água diferente de zero suscitam algumas reservas. Por este motivo, torna-se clara a necessidade de desenvolver trabalhos futuros conducentes à melhoria das condições de ensaio para teores em água diferentes de zero. Dessa forma será possível obter curvas de evolução da condutividade térmica em função do teor em água, até mesmo em condições de total saturação.

## **7. Modelação numérica da transferência de calor no solo**

O funcionamento dos Sistemas Geotérmicos de Baixa Entalpia resulta do estabelecimento de gradientes térmicos, que por sua vez resultam na geração de fluxos de calor. Neste capítulo pretende-se modelar a permuta de calor resultante do funcionamento de sistemas deste tipo e obter algum conhecimento acerca da resposta do solo face à acção térmica por eles imposta.

O estudo foi realizado com recurso ao *software* FLAC 7.0 *Thermal* desenvolvido pelo *Itasca Consulting Group*. O modelo obtido teve por base o método das diferenças finitas (FDM), tendo sido utilizados dados de base apresentados no capítulo anterior e outros disponíveis na bibliografia.

Em primeira análise será apresentada a influência da variação anual de temperatura, na temperatura do solo em profundidade para as condições climatológicas à superfície de algumas cidades do território nacional. Segue-se o estudo do comportamento térmico do solo face à acção térmica imposta por uma única geoestrutura termoactiva.

### **7.1. Condições iniciais: definição do modelo numérico**

O comportamento térmico do solo foi abordado considerando dois casos simples. O primeiro, onde se analisou a influência da oscilação anual de temperatura à superfície, na temperatura do solo em profundidade, e o segundo onde se estudou a resposta térmica do solo face à acção conjugada da variação de temperatura superficial e da estrutura termoactiva considerada.

Utilizou-se uma malha de 50 por 60, totalizando 1235 elementos, tal como se apresenta na Figura 7.1. A malha é heterogénea, apresentando maior discretização em duas zonas distintas. Na zona superior, por aí existirem maiores variações de temperatura provocadas pela oscilação da temperatura superficial e, no limite esquerdo, por ser esse o local de implementação da estaca termoactiva.

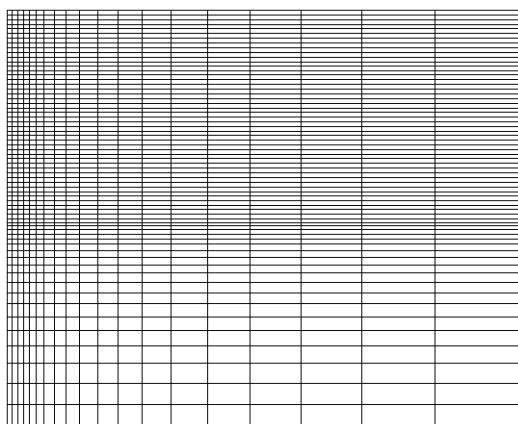


Figura 7.1 Malha de elementos finitos utilizada

As simulações realizadas e apresentadas consideram unicamente o comportamento térmico do solo. A transferência de energia térmica é realizada por condução, desprezando-se a influência da convecção e radiação. Para isso foi considerado um modelo isotrópico axissimétrico onde as propriedades térmicas do solo não variam com a temperatura. O estudo do comportamento mecânico do solo face à imposição das acções térmicas foi também desprezado. A análise foi realizada para um período de tempo máximo de quatro anos. As propriedades térmicas do solo necessárias para realização da modelação numérica por diferenças finitas são, segundo Itasca (2011), o calor específico  $c$  e condutividade térmica  $\lambda$ . Para além destas, é ainda necessário conhecer a massa volúmica do solo.

A variação de temperatura anual foi definida tendo em consideração uma função periódica tal como sugerido por Hillel (1998) e Vieira e Maranha (2009).

$$T(t) = T_m + \Delta T_s \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi}{\bar{P}} \cdot (t - \varepsilon_t) \quad (7.1)$$

em que  $T$  é a temperatura num dado instante  $t$  e  $T_m$  é a temperatura média anual.  $\bar{P}$  é o período,  $\Delta T_s$  a amplitude térmica e  $\varepsilon_t$  a fase. Com base nos valores de temperaturas média anual máxima, mínima e média, foi modelada a variação anual de temperatura à superfície para o período de um ano. Os valores necessários para a aplicação da equação (7.1) apresentam-se na Tabela 7.1 para as três cidades.

Tabela 7.1 Parâmetros climatológicos para três cidades portuguesas

Cidade	Temperatura média anual $T_m$ (°C)	Amplitude $T_s$ (°C)	Período $\bar{P}$ (ano)	Fase $\varepsilon_t$ (s)
Lisboa	17,1*	4,0*	1,0	0,0
Porto	14,65*	1,85*		
Beja	16,55*	6,05*		

\*fonte: <http://www.pordata.pt/Subtema/Portugal/Poluicao+Atmosferica+e+Clima-86>

Graficamente a oscilação anual de temperatura para as três cidades portuguesas é descrita como se ilustra na Figura 7.2.

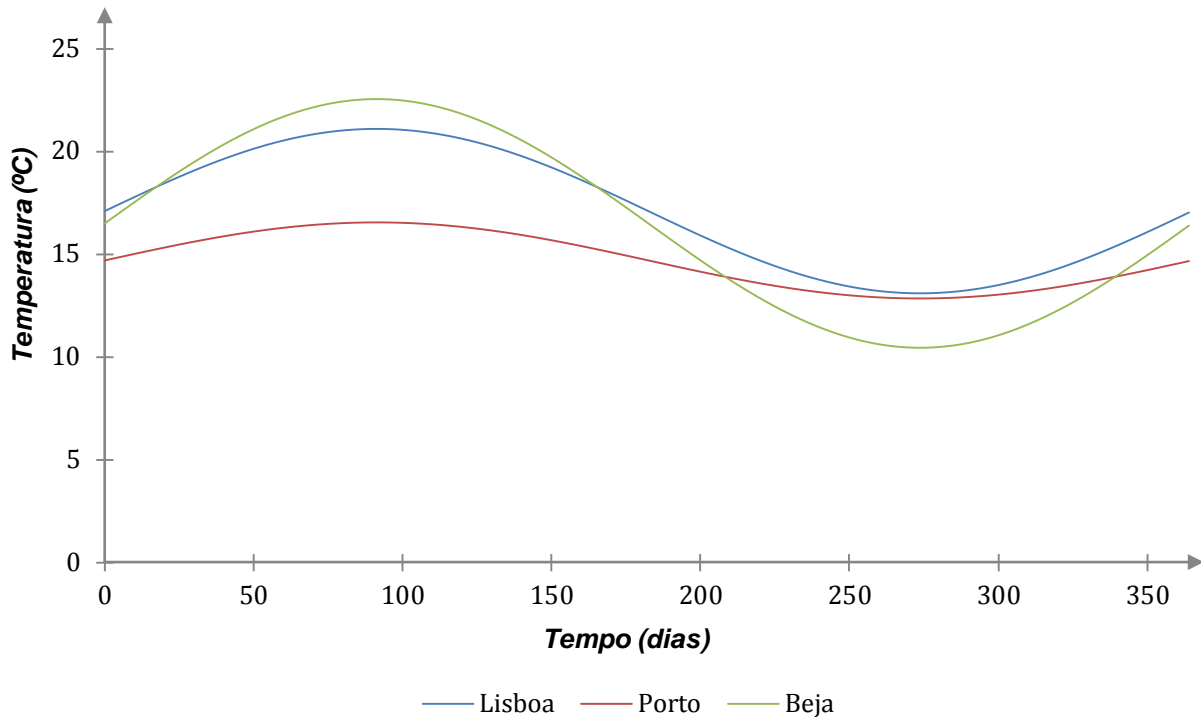


Figura 7.2 Variação anual de temperatura para três cidades portuguesas

Como se confirma no gráfico acima apresentado, a variação da temperatura à superfície têm maior amplitude na cidade de Beja. Por outro lado, o Porto, apresenta menores amplitudes térmicas comparativamente às outras cidades estudadas.

## 7.2. Distribuição de temperaturas sem estrutura termoactiva

A influência da temperatura superficial na temperatura do solo em profundidade pode ser definida para qualquer solo através da equação (7.2) (Hillel, 1998). Nesta expressão a temperatura em profundidade é função da difusividade térmica ( $\alpha$ ), do calor específico ( $c$ ), do período de oscilação ( $\bar{P}$ ), da temperatura média à superfície ( $T_m$ ) e da amplitude térmica ( $\Delta T_s$ ).

$$T(t, z) = T_m + \Delta T_s \cdot \left[ \sin \left( \frac{2 \cdot \pi}{\bar{P}} \cdot t - \frac{z}{d} \right) \right] \cdot e^{-\frac{z}{d}} \quad (7.2)$$

em que  $d$  é a parcela referente à atenuação da influência da temperatura em profundidade. O seu valor é dado por:

$$d = \sqrt{\frac{\lambda \cdot \bar{P}}{\pi \cdot \rho \cdot c}} \quad (7.3)$$



Numericamente a resposta térmica do solo pode ser analisada considerando o calor específico, densidade e condutividade térmica do solo. O estudo numérico foi realizado para duas situações distintas. Uma com o solo totalmente seco e outra com o solo totalmente saturado. No primeiro cenário utilizou-se a condutividade térmica e massa volúmica determinadas no capítulo anterior. O calor específico foi obtido com recurso à equação (4.6), optando-se todavia pela diferenciação dos vários constituintes da fracção mineral. Desta forma, considerou-se uma fracção sólida com 85% de quartzo e 15% de feldspatos (ortóclase), sendo a equação (4.6) reescrita para o caso de solo seco ( $c_{solo,d}$ ) e saturado ( $c_{solo,sat}$ ) como:

$$c_{solo,d} = x_{qz} \cdot c_{qz} + x_{ort} \cdot c_{ort} + x_a \cdot c_a \quad (7.4)$$

$$c_{solo,sat} = x_{qz} \cdot c_{qz} + x_{ort} \cdot c_{ort} + x_w \cdot c_w \quad (7.5)$$

onde  $x_{ort}$  e  $c_{ort}$  são respectivamente a fracção volumétrica e calor específico da ortóclase. A aplicação das formulações apresentadas nas equações (7.4) e (7.5) foi realizada considerando os valores de calor específico apresentados na Tabela 4.4.

Para o cálculo da condutividade térmica e calor específico em condições de saturação total, foram utilizados métodos empíricos. A primeira das propriedades foi obtida recorrendo ao método de Côté e Konrad, a segunda utilizando a formulação já aplicada no caso seco. A massa volúmica do solo obteve-se através da expressão:

$$\rho = \rho_d + S_r \cdot n \cdot \rho_w \quad (7.6)$$

com  $\rho_d = 1640,16 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ .

Os dados de base utilizados para a modelação numérica por diferenças finitas apresentam-se sintetizados na Tabela 7.2.

**Tabela 7.2 Propriedades base utilizadas nos cálculos numéricos**

Estado	Calor específico ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Condutividade térmica ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Massa Volúmica ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
Solo seco	882,882 <sup>a)</sup>	0,452 <sup>b)</sup>	1640,160 <sup>b)</sup>
Solo saturado	2115,070 <sup>a)</sup>	2,744 <sup>c)</sup>	2028,380 <sup>d)</sup>

a) Obtido pelo método da média aritmética ponderada, b) Determinado em laboratório, c) Determinado pelo método de Côté e Konrad, d) determinado com recurso à equação (7.6)

A temperatura à superfície foi aplicada nos nós que materializam o limite superior da malha, sendo por isso uma condição de fronteira de temperatura variável. As restantes fronteiras não permitem a transferência de calor, designando-se por isso adiabáticas. Como referido anteriormente, o modelo foi corrido durante o período de tempo correspondente a quatro anos. A temperatura à superfície nesse período para cada uma das cidades estudadas é apresentado na Figura 7.3.

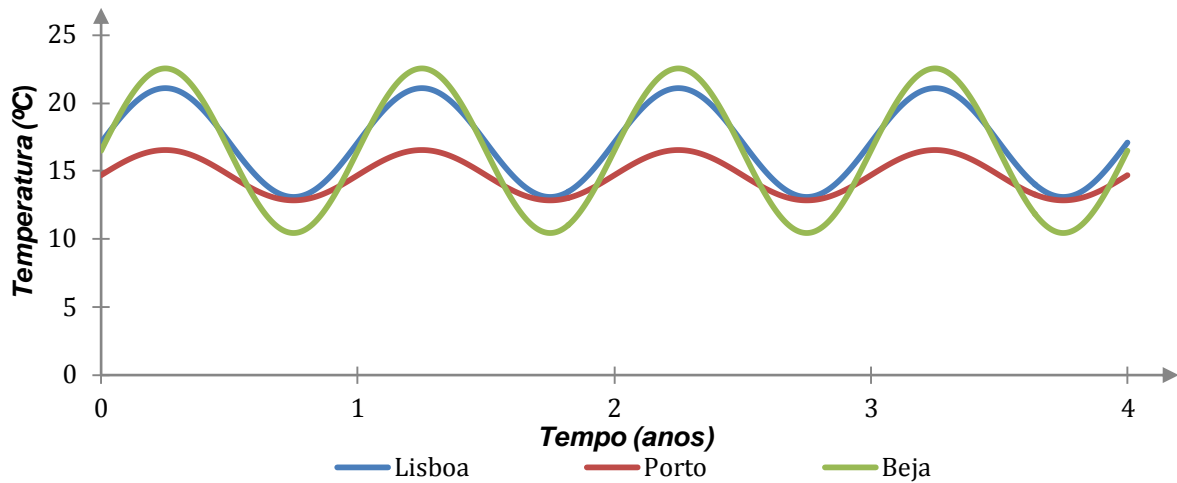


Figura 7.3 Oscilação anual de temperatura para Lisboa, Porto e Beja durante quatro anos

Durante o intervalo de tempo para o qual foi realizada a análise numérica foram monitorizadas as variações de temperatura a várias profundidades. Com base nos dados recolhidos constatou-se, tal como se esperava, que a amplitude de variação da temperatura com a profundidade tende a diminuir, até ser atingida uma amplitude de variação nula. Nesse ponto a temperatura do solo passa a ser igual à temperatura média anual à superfície (zona homotérmica). Nas Figuras 7.4 a 7.9 é possível observar as curvas que materializam a oscilação de temperatura para diferentes profundidades, para as três cidades estudadas e para os dois estados de saturação considerados.

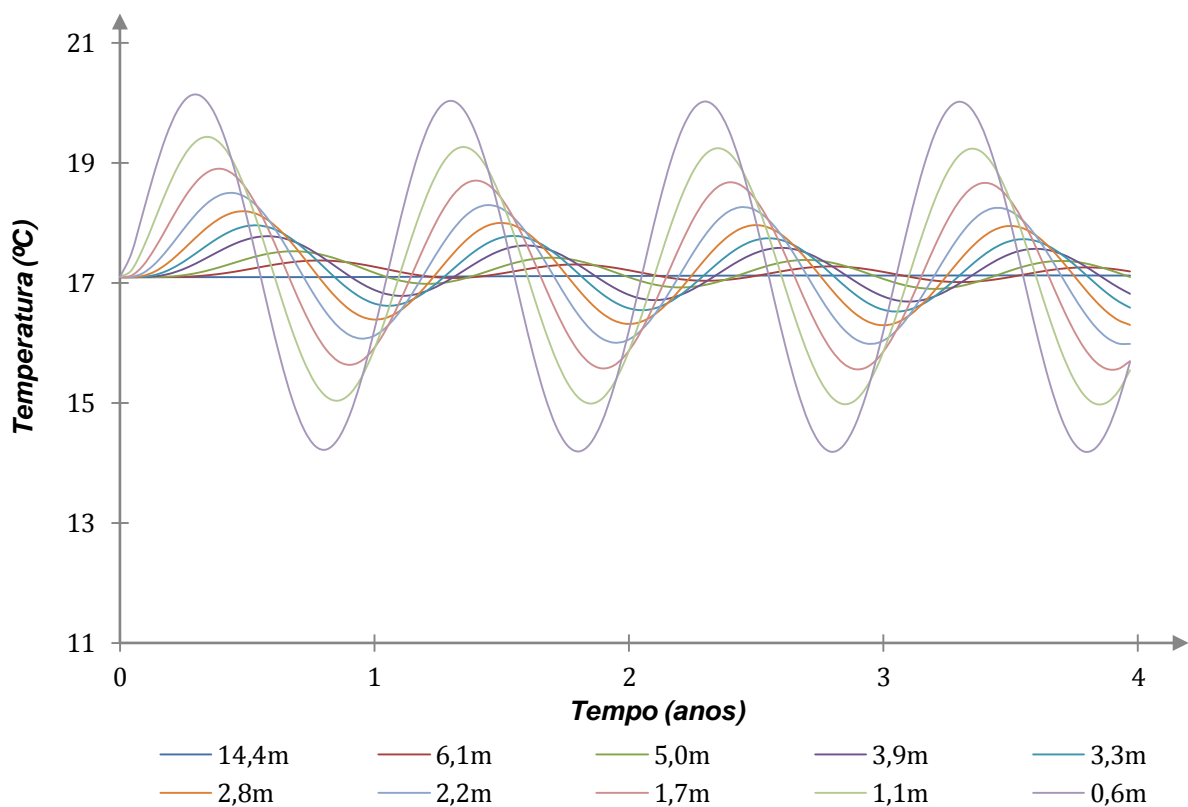


Figura 7.4 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Lisboa ( $S_r=0$ )

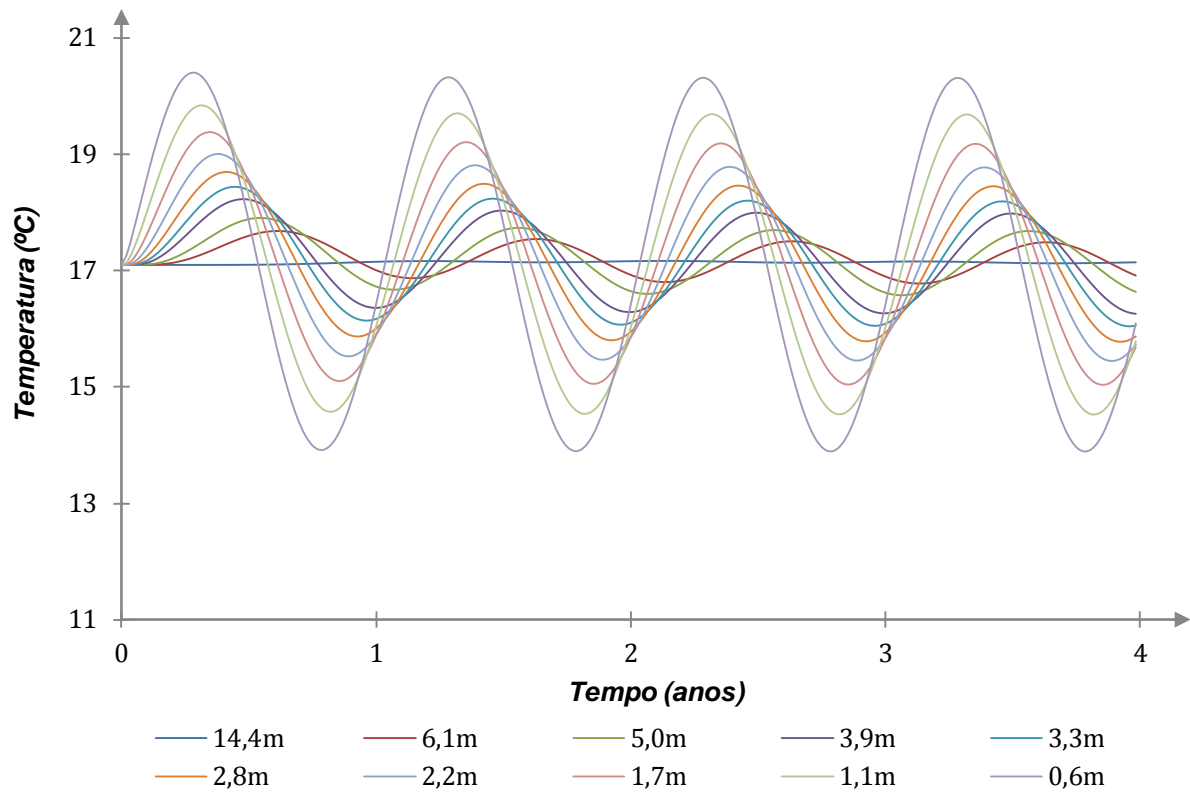


Figura 7.5 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Lisboa ( $S_r=1$ )

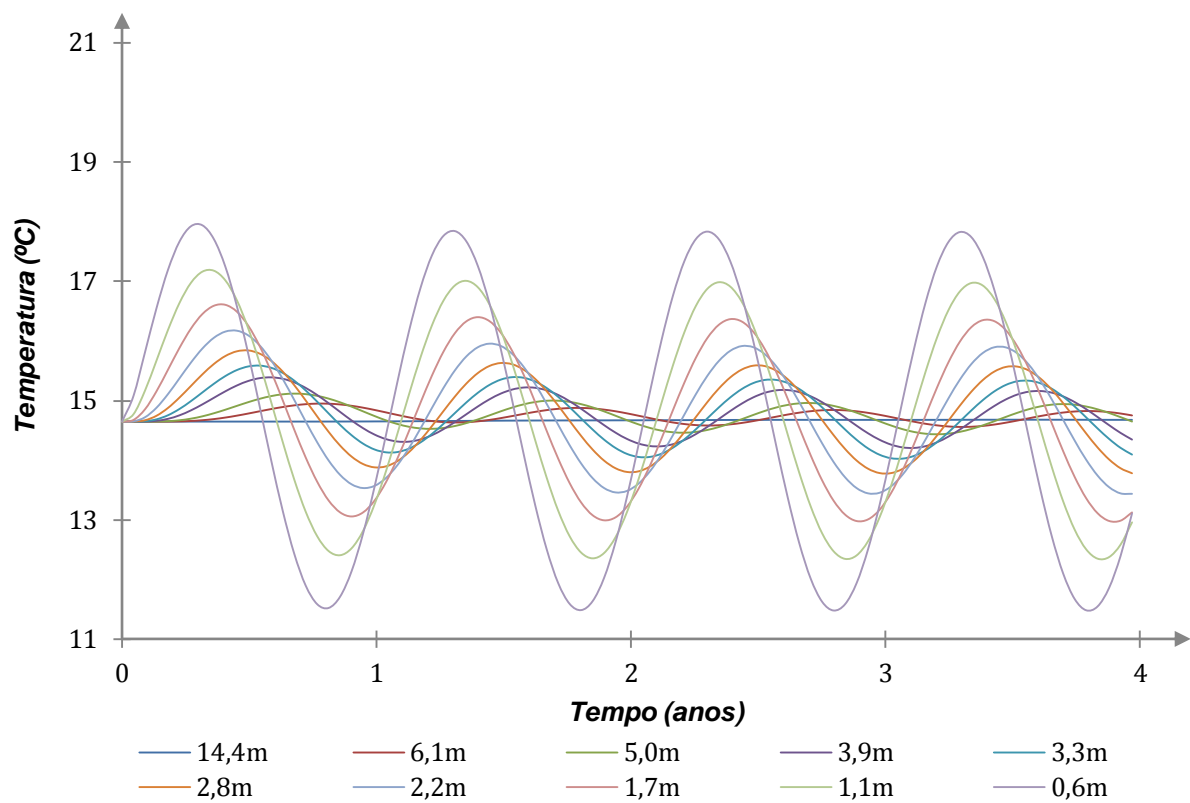


Figura 7.6 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Porto ( $S_r=0$ )

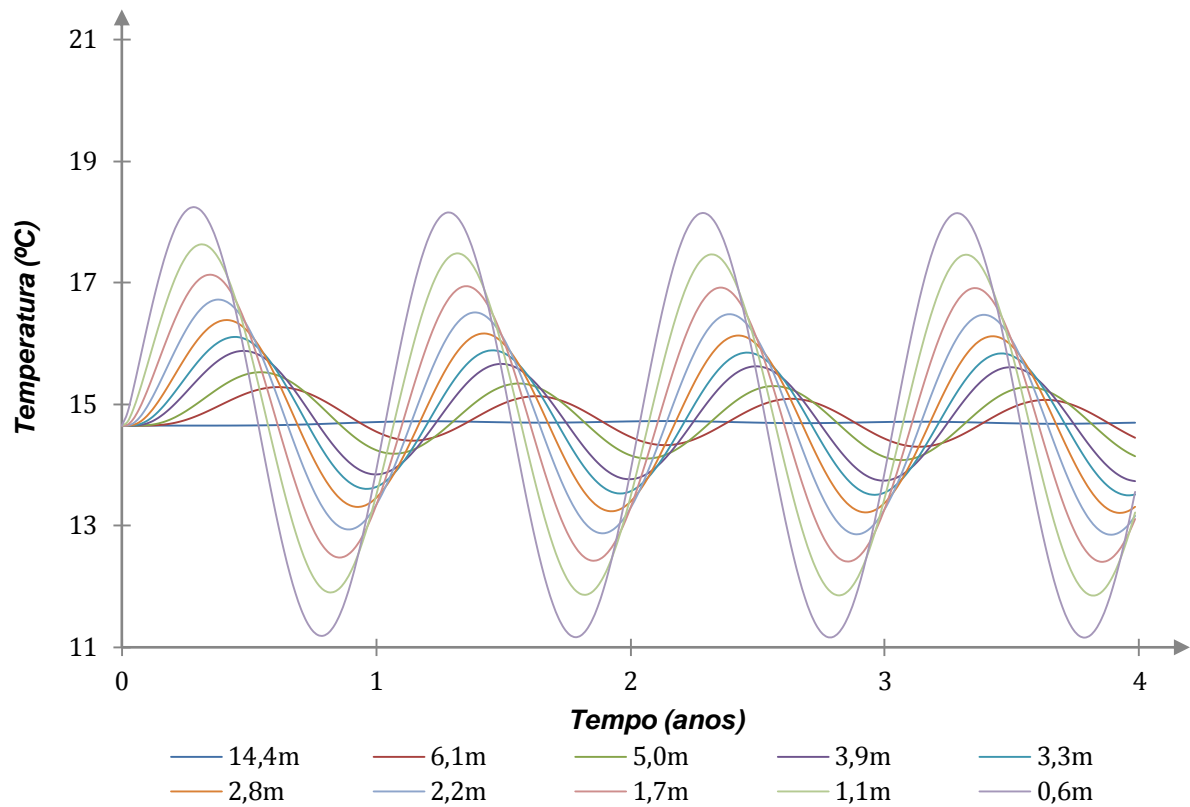


Figura 7.7 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Porto ( $S_r=1$ )

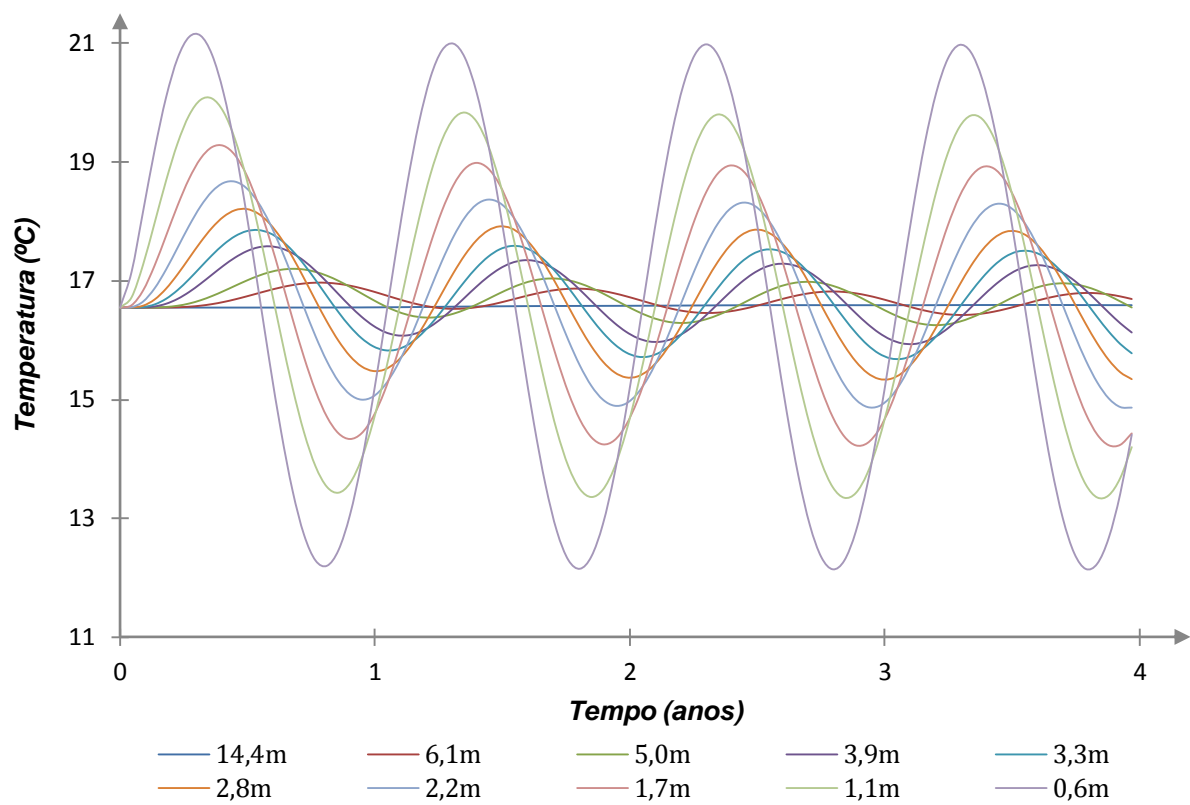
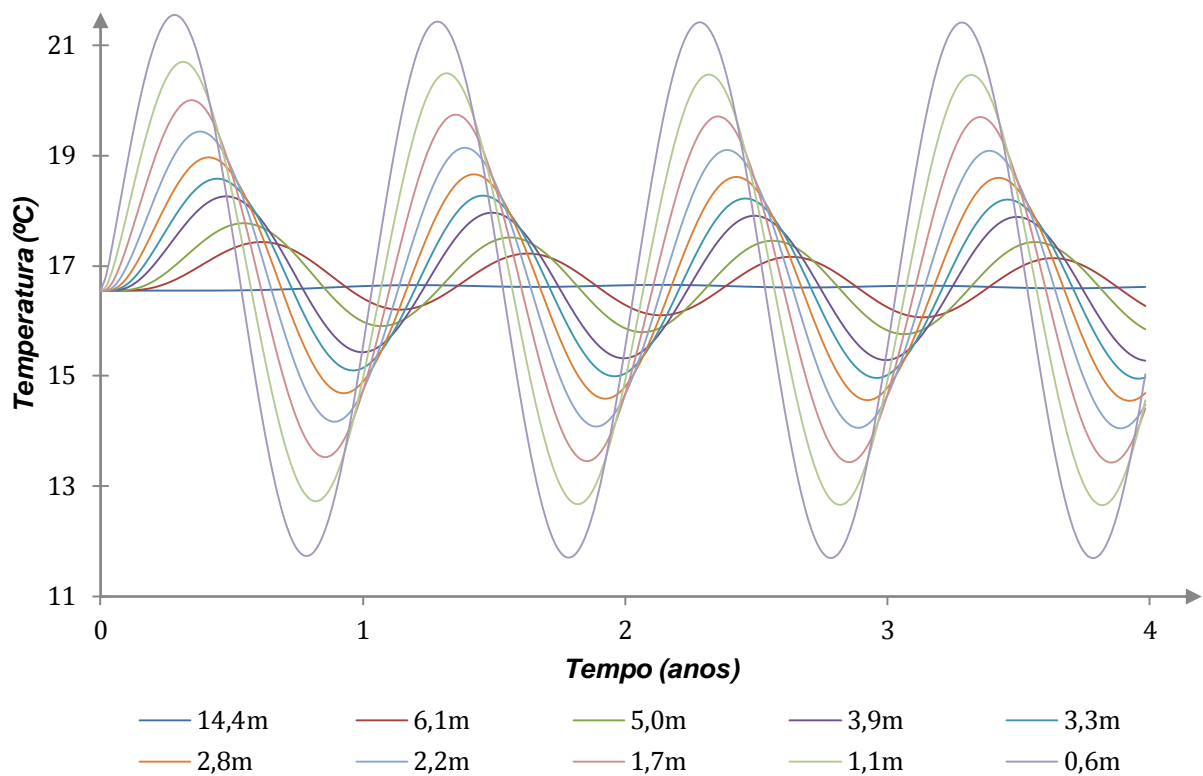


Figura 7.8 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Beja ( $S_r=0$ )



**Figura 7.9 Oscilação de temperatura em profundidade para as condições climatológicas de Beja**

Analisando as curvas apresentadas pode concluir-se que a amplitude térmica em profundidade está directamente relacionada com a amplitude da curva que define a variação anual de temperatura à superfície. Quando comparadas as respostas térmicas do solo para as condições climatológicas de Lisboa e Porto, não se verificam diferenças substanciais no seu andamento. Tal facto é justificado pela semelhança entre as amplitudes térmicas. Contudo, quando se compara os resultados para uma destas cidades com os obtidos para as condições climatológicas de Beja, observa-se que para a mesma profundidade a influência da temperatura à superfície é maior nesta cidade. Ou seja, a influência da variação anual de temperatura à superfície não é dependente do valor absoluto de temperatura máxima e mínima do solo, mas sim do valor resultante da diferença relativa entre estes. Neste caso é também constatável o papel do teor em água, observando-se para a mesma profundidade maior amplitude de variação em condições de total saturação.

Nas Figuras 7.10 e 7.11 ilustram-se os perfis de temperatura máxima e mínima para as condições de solo seco e saturado para as três cidades estudadas. Em cada um dos gráficos são apresentadas curvas onde são sintetizados os valores máximos e mínimos de temperatura a cada profundidade, registados no domínio em estudo durante o intervalo de tempo da análise. Em qualquer um dos casos é visível a convergência da temperatura do solo para o valor de temperatura média anual, à medida que a profundidade aumenta. Em condições de saturação obtiveram-se perfis indicando influência da temperatura superficial até maior profundidade (Figura 7.11). No caso seco essa influência é ligeiramente mais reduzida (Figura 7.10).

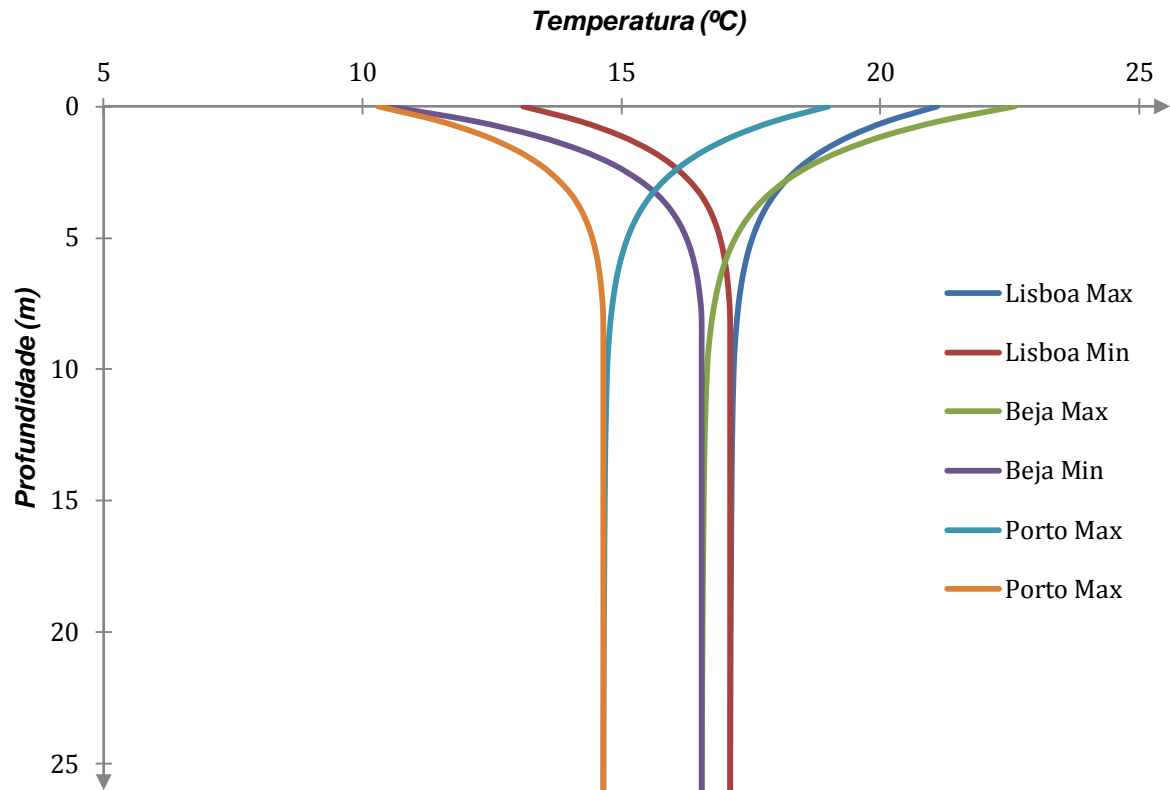


Figura 7.10 Perfis de temperatura máxima e mínima do solo nas condições de  $S_r = 0$

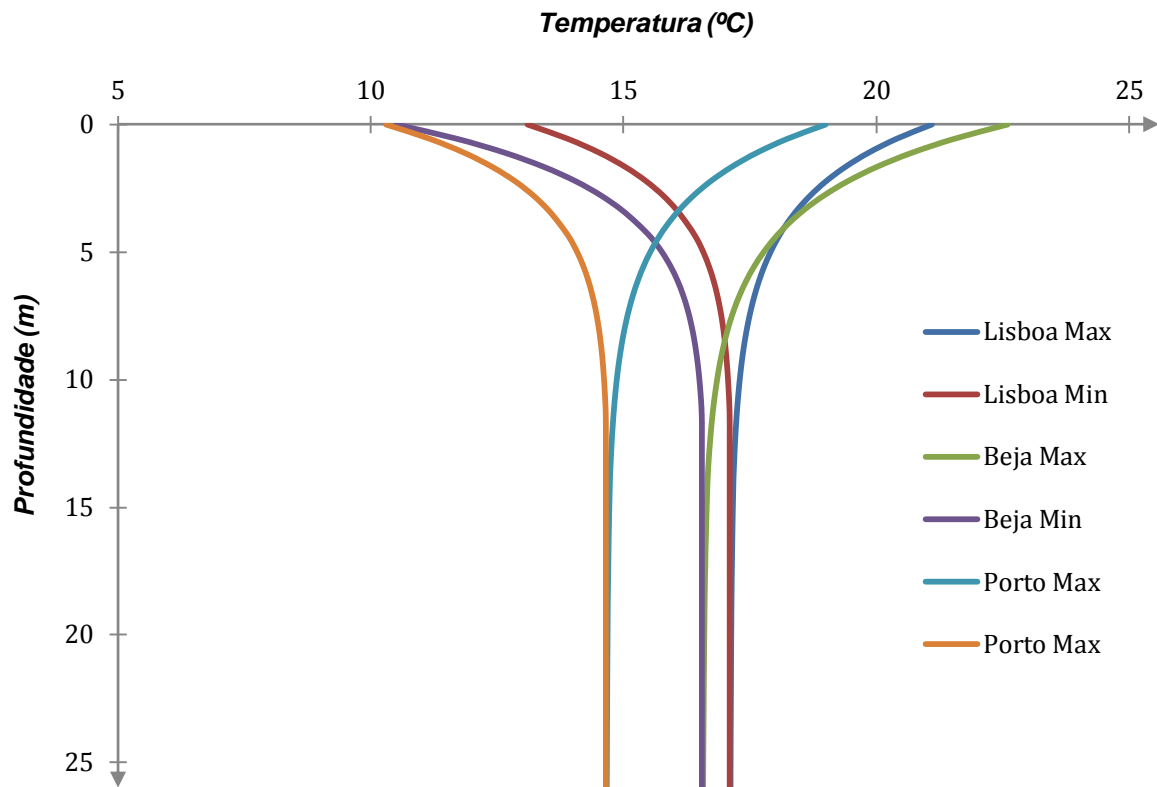


Figura 7.11 Perfis de temperatura máxima e mínima do solo nas condições de  $S_r = 0$

Analisando os gráficos ilustrados nas Figuras 7.10 e 7.11, facilmente se conclui que, no caso seco, as oscilações anuais de temperatura à superfície condicionam a temperatura do solo até uma profundidade próxima de 10m, no caso saturado essa profundidade é superior atingindo os 15m. Observa-se também uma maior penetração da perturbação no caso da cidade de Beja, sendo as amplitudes de variação em profundidade superiores às obtidas para Lisboa e Porto. Tal facto resulta da maior amplitude térmica sentida à superfície nesta cidade comparativamente às duas últimas.

### 7.3. Distribuição de temperaturas com uma estrutura termoactiva

No caso da influência de uma estrutura termoactiva de fundação no campo de temperaturas do solo, considerou-se uma estaca de betão, fundação profunda, introduzida no solo arenoso já estudado (Figura 7.12).

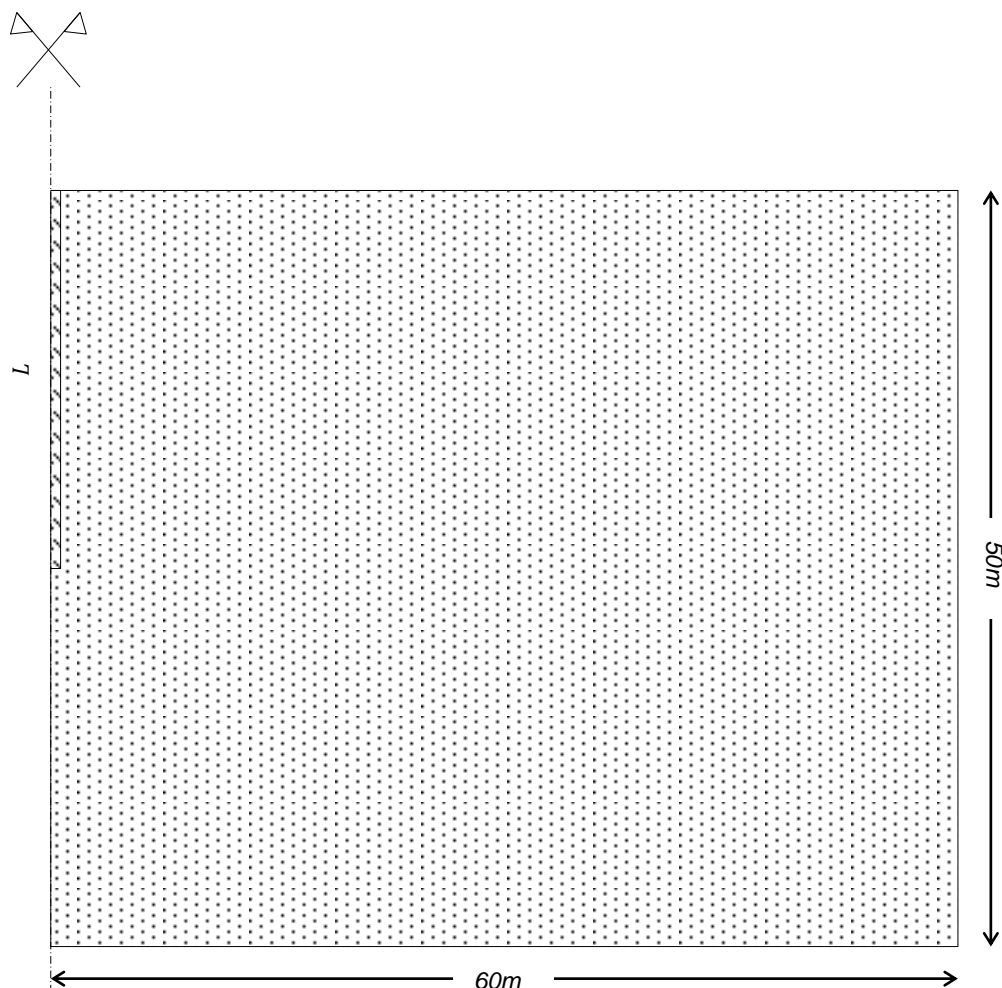


Figura 7.12 Geometria do problema (escala 1:500)

A estaca foi modelada considerando as dimensões apresentadas na Tabela 7.3. O comportamento mecânico não foi considerado, não existindo qualquer carga axial aplicada à infra-estrutura. O betão foi considerado homogéneo e com comportamento térmico isótropo. As suas propriedades térmicas foram definidas com base em valores presentes na bibliografia, apresentados na Tabela 7.4. Estes

foram determinados para um betão com traço 1:2,33:4,66, valores correspondentes ao cimento, areia e brita, respectivamente. O agregado fino, areia, é constituído por grãos predominantemente de quartzo enquanto o agregado grosso é composto por uma brita de origem calcária. O solo foi estudado considerando à semelhança do caso anterior para condições isotrópicas e invariáveis no tempo.

**Tabela 7.3 Características geométricas das estacas modeladas**

<b>Estaca</b>	<b>Diâmetro (<math>D</math>)</b> (mm)	<b>Comprimento (<math>L</math>)</b> (m)
E1	500	10
E2	1000	

**Tabela 7.4 Características do betão utilizado no estudo numérico**

<b>Estado</b>	<b>Calor específico</b> (J·kg <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	<b>Condutividade térmica</b> (W·m <sup>-1</sup> ·°C <sup>-1</sup> )	<b>Massa Volúmica</b> (kg·m <sup>-3</sup> )
Betão seco	940,0**	2,03*	2585,0**
Betão saturado	1257,0**	2,93*	2685,0**

\*segundo Khan (2002); \*\*segundo Vieira e Maranha (2009)

A acção térmica imposta ao solo é agora constituída por duas parcelas distintas: uma resultado da variação da temperatura anual à superfície e outra provocada pela estrutura termoactiva. A primeira será materializada no modelo através da definição da função oscilação anual de temperatura para as condições climatológicas da cidade de Lisboa. No caso da segunda acção térmica optou-se pela utilização da metodologia apresentada em Vieira e Maranha (2009). Segundo estes autores a função variação de temperatura na estaca, é definida com base na mesma formulação que a utilizada para descrever a função variação de temperatura atmosférica, variando com esta em fase todavia considerando uma amplitude térmica de variação superior. Como consequência disso, no Verão, a temperatura atmosférica máxima é inferior à temperatura na estaca (fluxo da estaca para o solo). O inverso acontece no Inverno, onde a temperatura atmosférica mínima é superior à temperatura na estaca (fluxo do solo para a estaca).

As amplitudes térmicas utilizadas para a definição da acção térmica imprimida pela estaca ao solo ( $\Delta T_{estaca}$ ) foram obtidas partindo do valor base de amplitude térmica à superfície para a cidade de Lisboa. Foram então definidas duas acções térmicas a aplicar pela estaca ao solo, designadas como AT1 e AT2, representando cada uma delas as maiores ou menores necessidades de aquecimento-arrefecimento. No caso de AT1, à amplitude térmica anual à superfície foram adicionados 2,5°C, para a AT2 optou-se pela soma de 5°C. Os parâmetros utilizados para definição das diferentes acções térmicas apresentam-se na Tabela 7.5.



Tabela 7.5 Parâmetros utilizados para a definição da acção térmica imposta pela estaca

Acção Térmica	$T_{m,estaca}$ (°C)	$\Delta T_{estaca}$ (°C)	$\bar{P}$ (ano)	$\varepsilon_t$ (s)
AT1	17,1	6,5	1,0	0,0
AT2		9,0		

Na Figura 7.13 ilustram-se graficamente as acções térmicas impostas pela estaca ao solo, bem como a acção imposta pela temperatura à superfície.

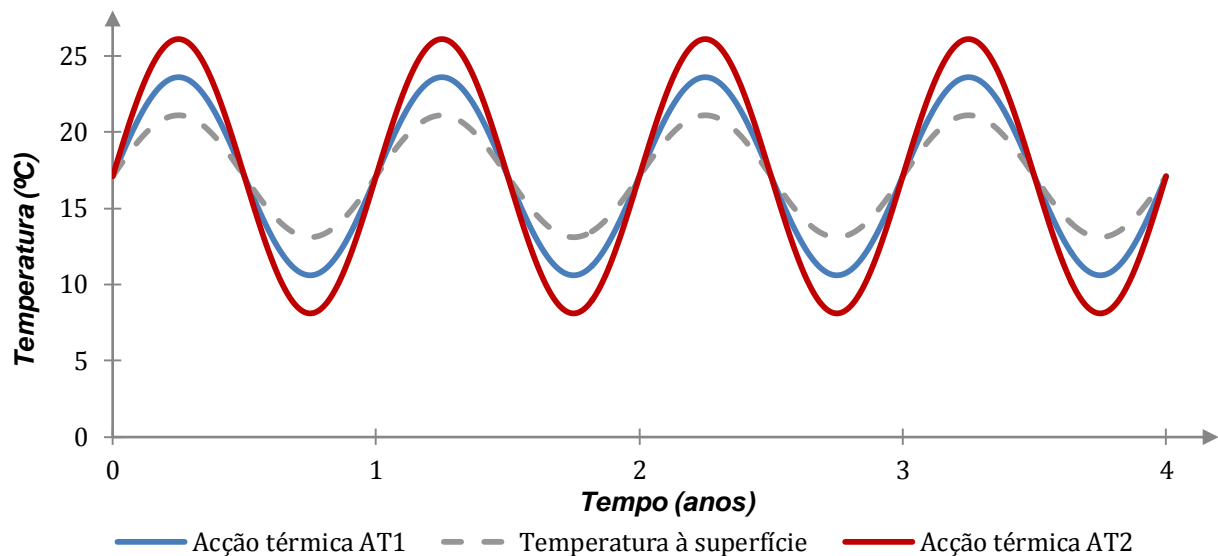


Figura 7.13 Oscilação da temperatura na estaca e à superfície para o intervalo de tempo de quatro anos

O modelo foi então corrido durante o período já mencionado. Para cada uma das análises numéricas realizadas determinaram-se os campos de temperatura máxima e mínima e com base nestes, os perfis verticais e horizontais de temperatura. Os primeiros foram obtidos para diferentes distâncias ao eixo da estrutura termoactiva, os segundos, segundo a direcção horizontal, para uma profundidade de 10m.

### 7.3.1. Perfis verticais de temperatura

Os perfis verticais de temperatura mínima e máxima foram determinados para as diferentes situações estudadas. Nas Figuras 7.14 a 7.17 apresentam-se os resultados para os casos de actuação da acção térmica AT1. Nas Figuras 7.18 a 7.21 os perfis verticais de temperatura para os cenários onde se aplicou a acção térmica AT2. A sua determinação foi realizada para diferentes distâncias relativamente ao eixo da estrutura permutadora de calor, considerando as diferentes geometrias e estados de saturação do solo. Apresenta-se ainda em cada um dos gráficos o perfil de temperatura sem introdução de qualquer infra-estrutura, definido pelas curvas a tracejado.

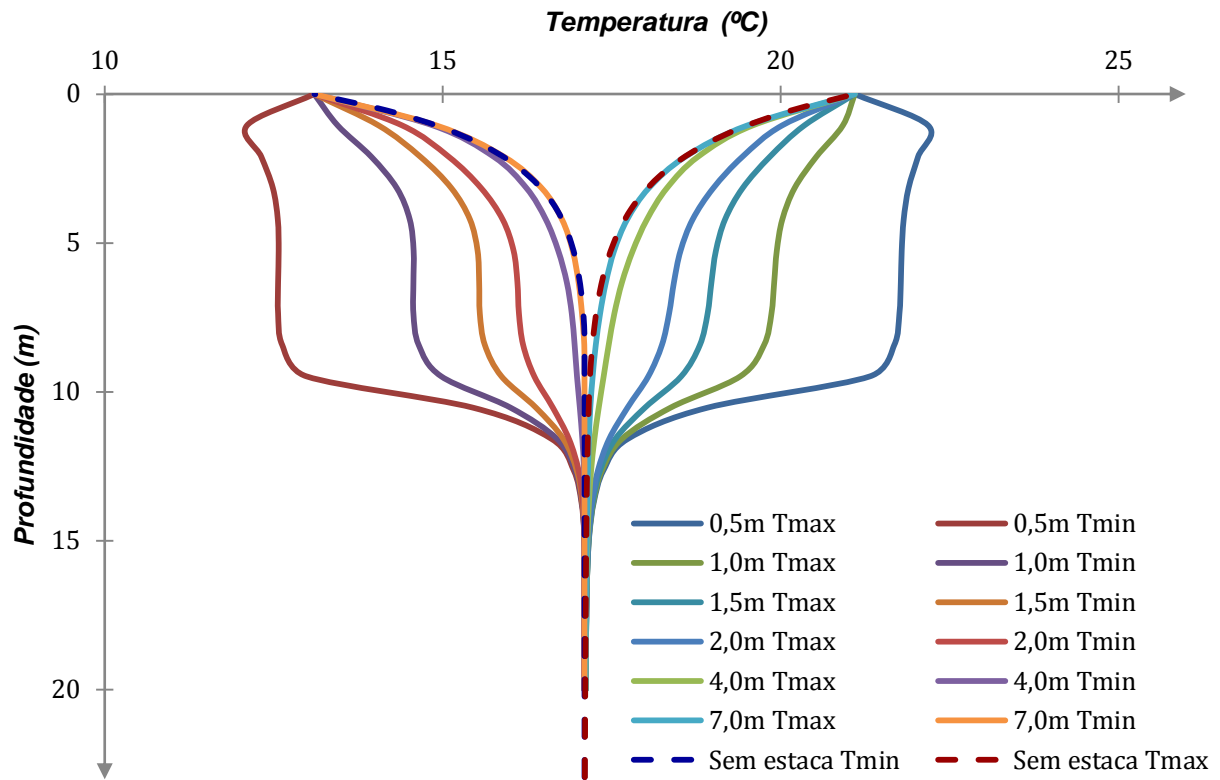


Figura 7.14 Perfis de temperatura do solo seco para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E1 e acção térmica AT1

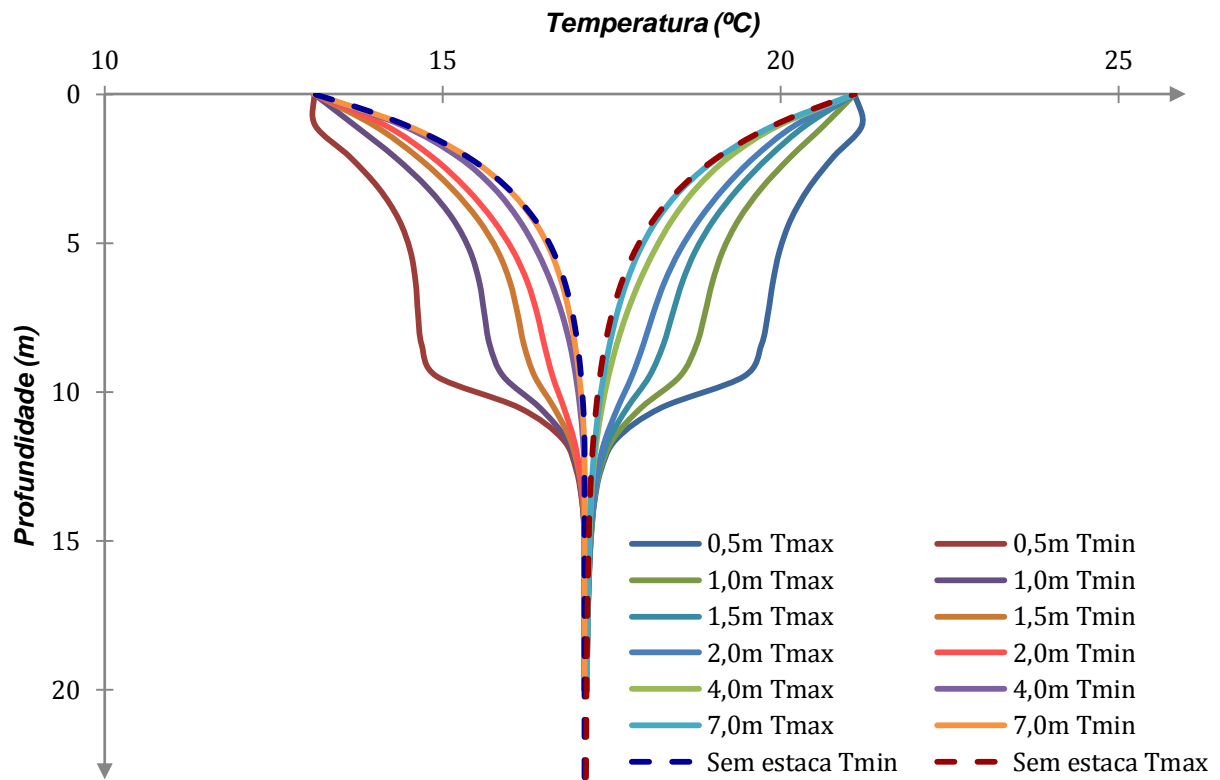


Figura 7.15 Perfis de temperatura do solo saturado para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E1 e acção térmica AT1

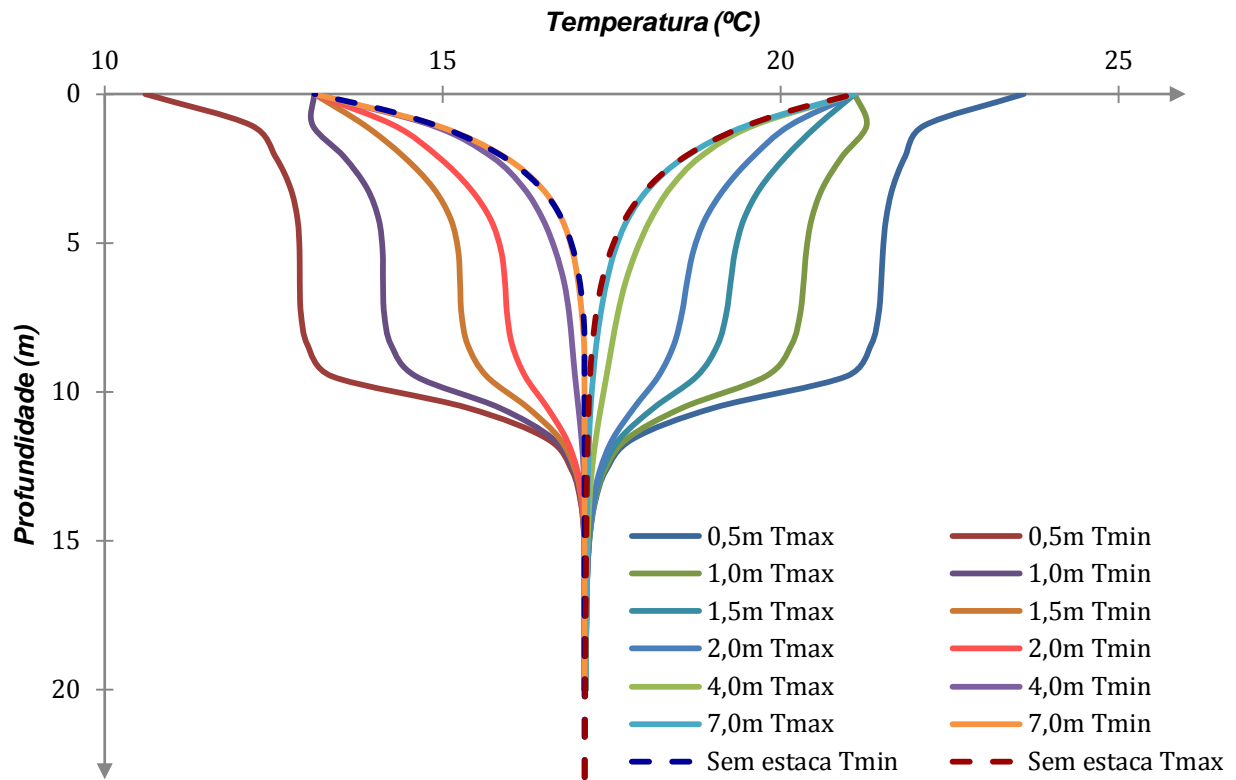


Figura 7.16 Perfis de temperatura do solo seco para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E2 e acção térmica AT1

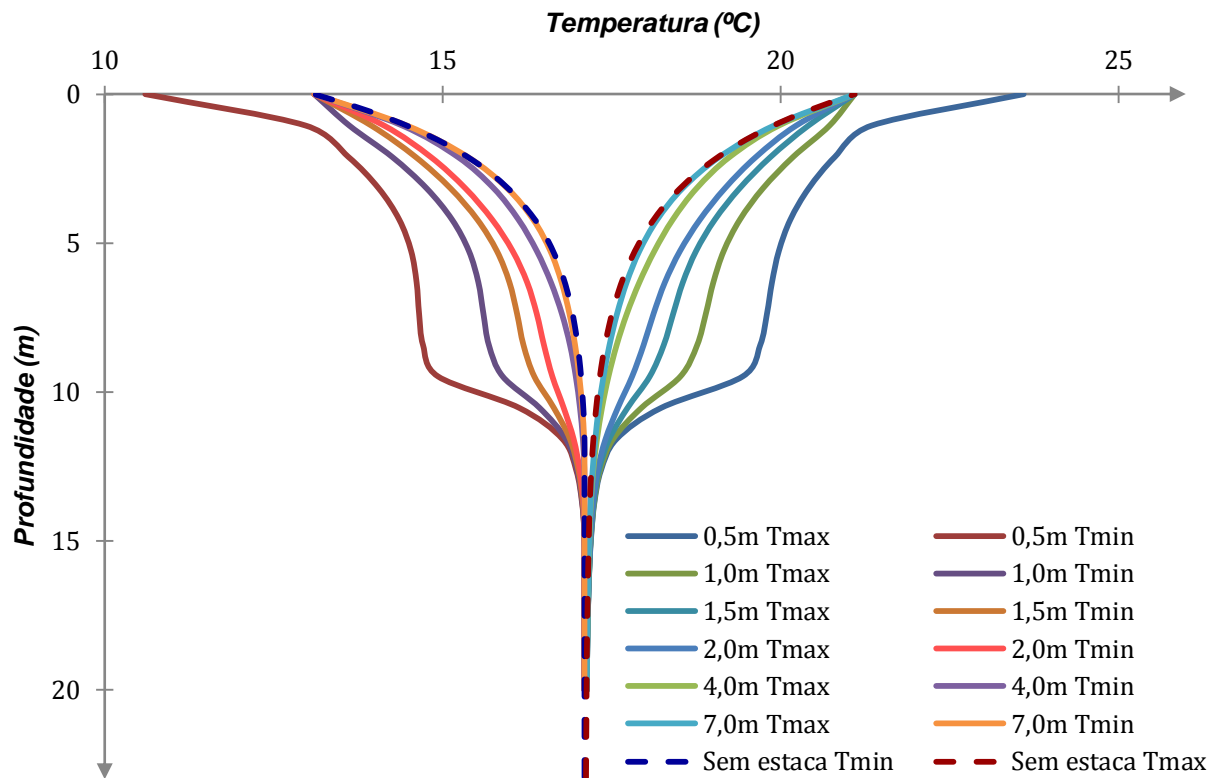


Figura 7.17 Perfis de temperatura do solo saturado para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E2 e acção térmica AT1

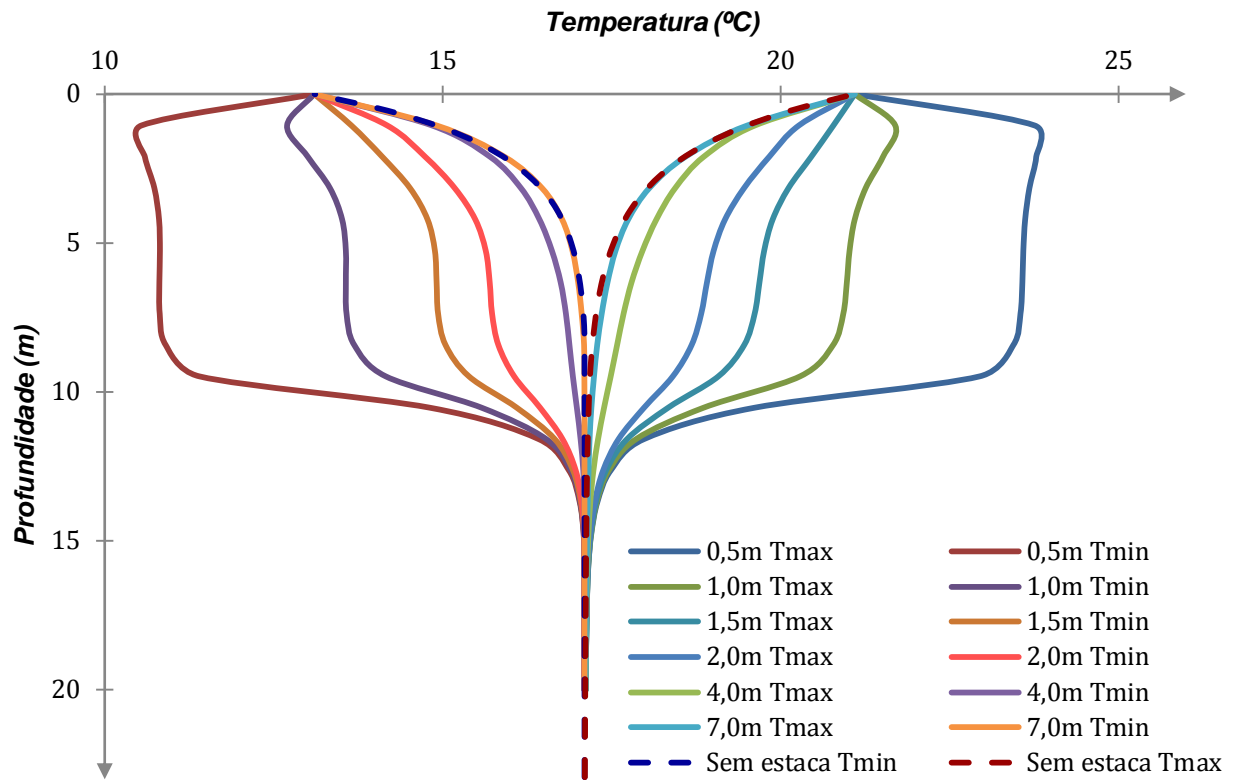


Figura 7.18 Perfis de temperatura do solo seco, para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E1 e acção térmica AT2

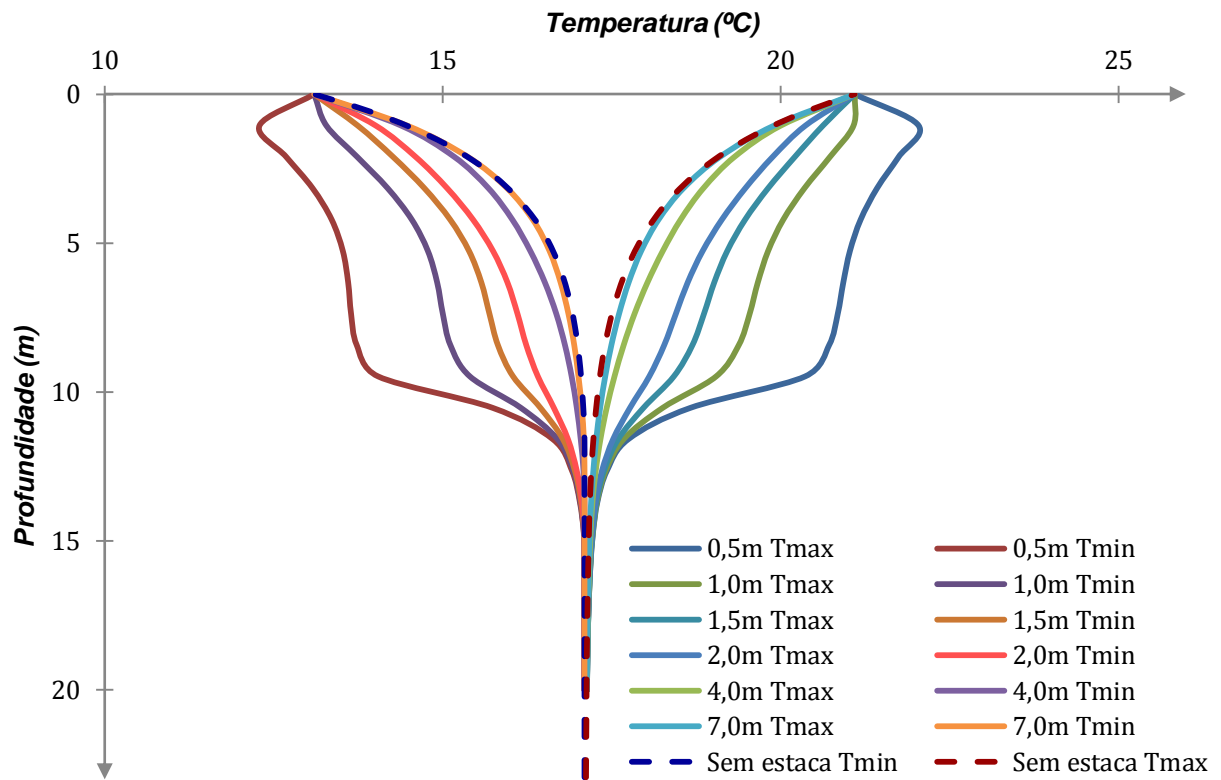


Figura 7.19 Perfis de temperatura do solo saturado para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E1 e acção térmica AT2

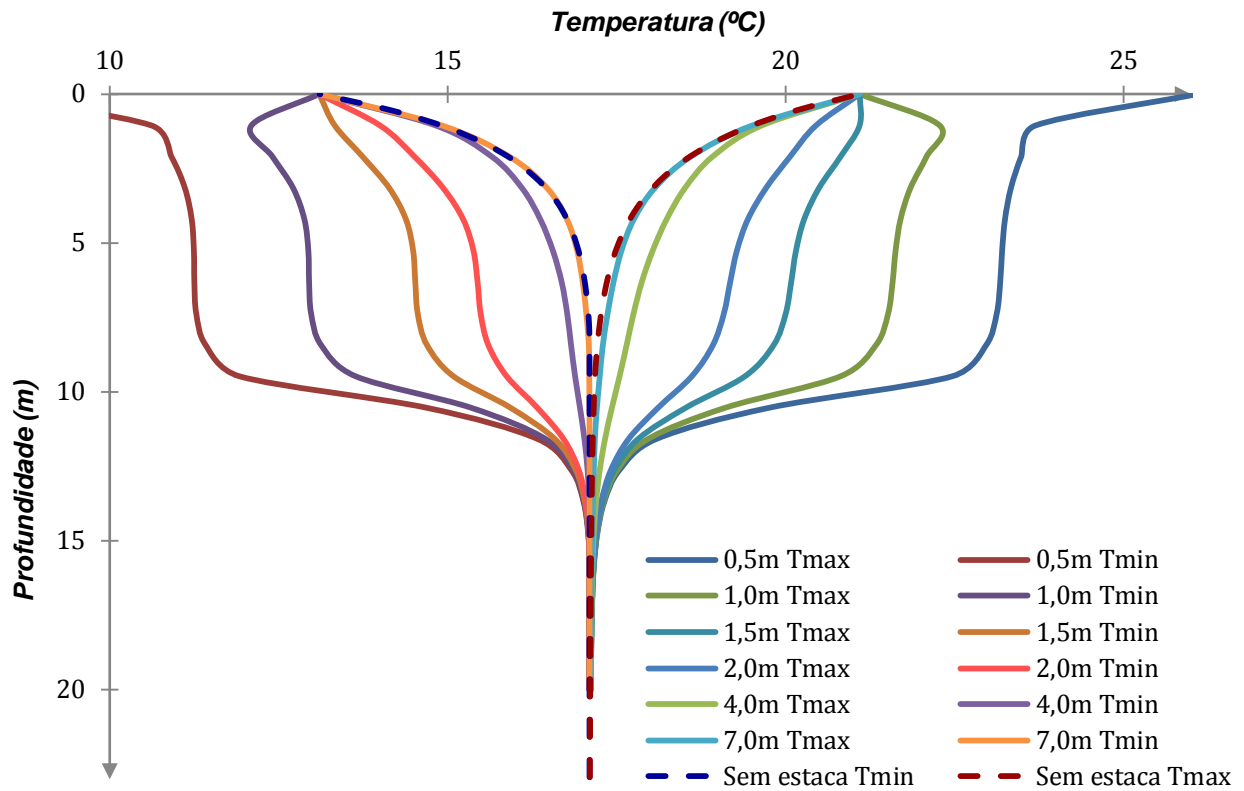


Figura 7.20 Perfis de temperatura do solo seco para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E2 e acção térmica AT2

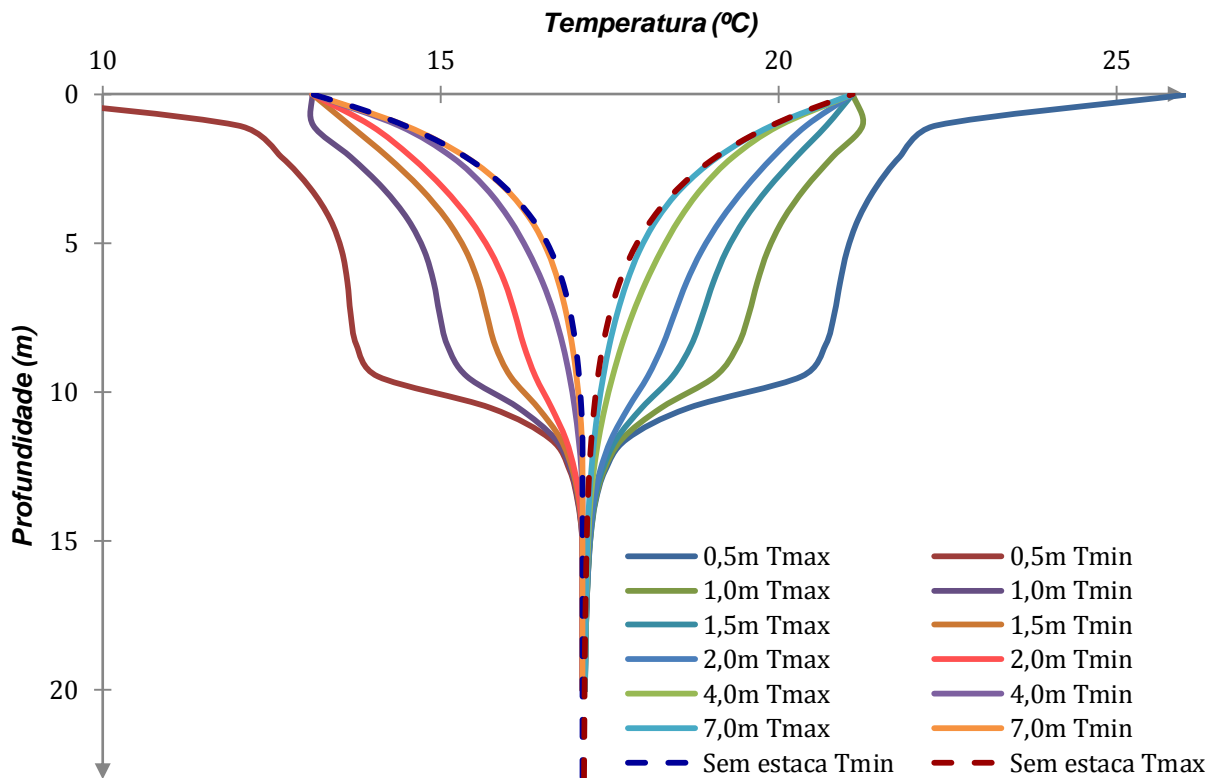


Figura 7.21 Perfis de temperatura do solo saturado para diferentes distâncias à estrutura termoactiva E2 e acção térmica AT2

Os perfis verticais de temperatura demonstram uma variação de temperatura até maiores distâncias segundo a direcção lateral para os casos de  $S_r=0$ . Tal facto resulta em perfis mais abertos quando comparados com  $S_r=1$ , indicando maior amplitude entre a temperatura máxima e mínima para a mesma distância radial à estaca. Ou seja, no caso de total saturação os perfis tendem a convergir mais rapidamente para o valor de temperatura sem estaca.

No caso do carregamento AT1, as amplitudes obtidas entre as temperaturas máxima e mínima são menores comparativamente a AT2 em virtude de o primeiro carregamento térmico apresentar menor amplitude térmica e variação.

No que se refere à temperatura na direcção vertical, é possível concluir que o funcionamento da estaca provoca variação de temperatura nas zonas mais próximas da estaca, até cerca de 15m. Esta profundidade vai diminuindo à medida que a distância à estaca aumenta. Em ambos os casos deixa de se verificar influência da estrutura permutadoras no perfil vertical de temperatura do solo para distâncias entre os 4m e 7m.

### 7.3.2. Perfis horizontais de temperatura

Os perfis horizontais de temperatura representam de forma simples os extremos máximos e mínimos para cada uma das situações estudadas. A variação de temperatura é dada em função da distância ao eixo da estaca e para a profundidade de 10m. Nas Figuras 7.22 e 7.23 ilustram-se os referidos perfis. Na primeira, face à acção térmica AT1 e na segunda face à acção térmica AT2.

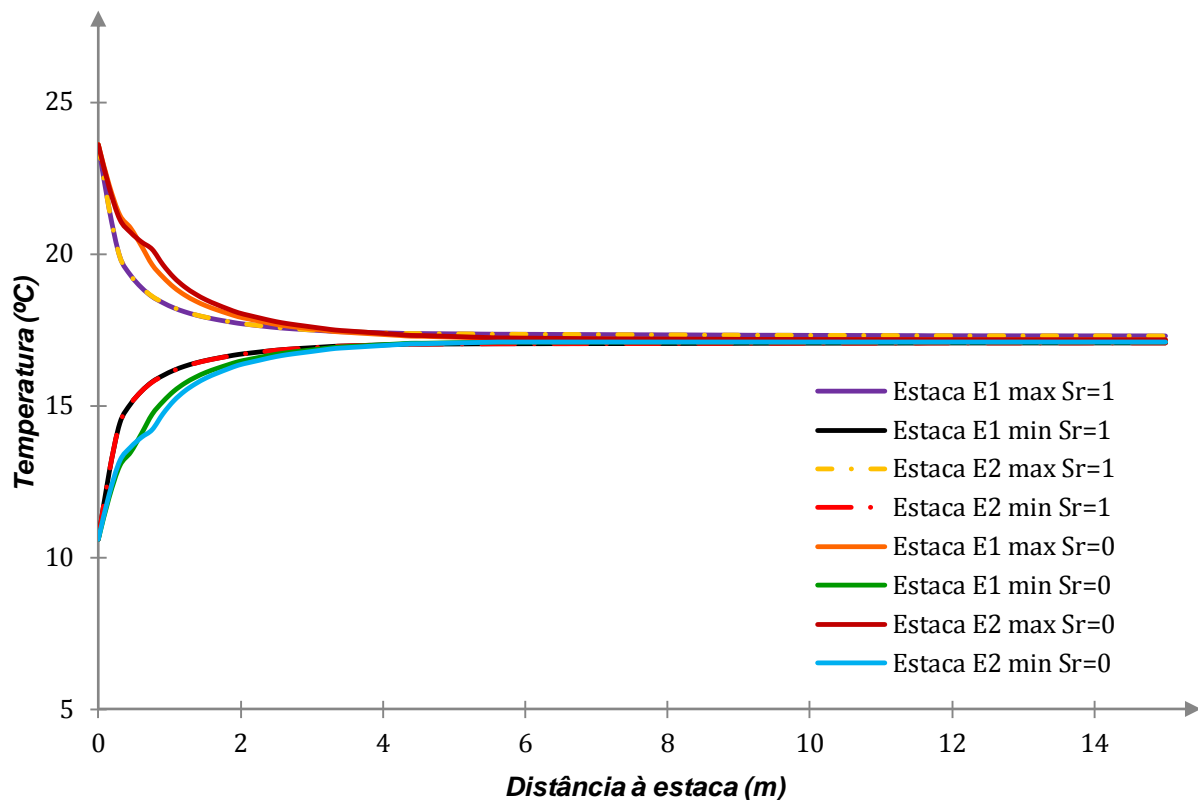


Figura 7.22 Perfil horizontal de temperatura para todas as situações analisadas e acção térmica AT1

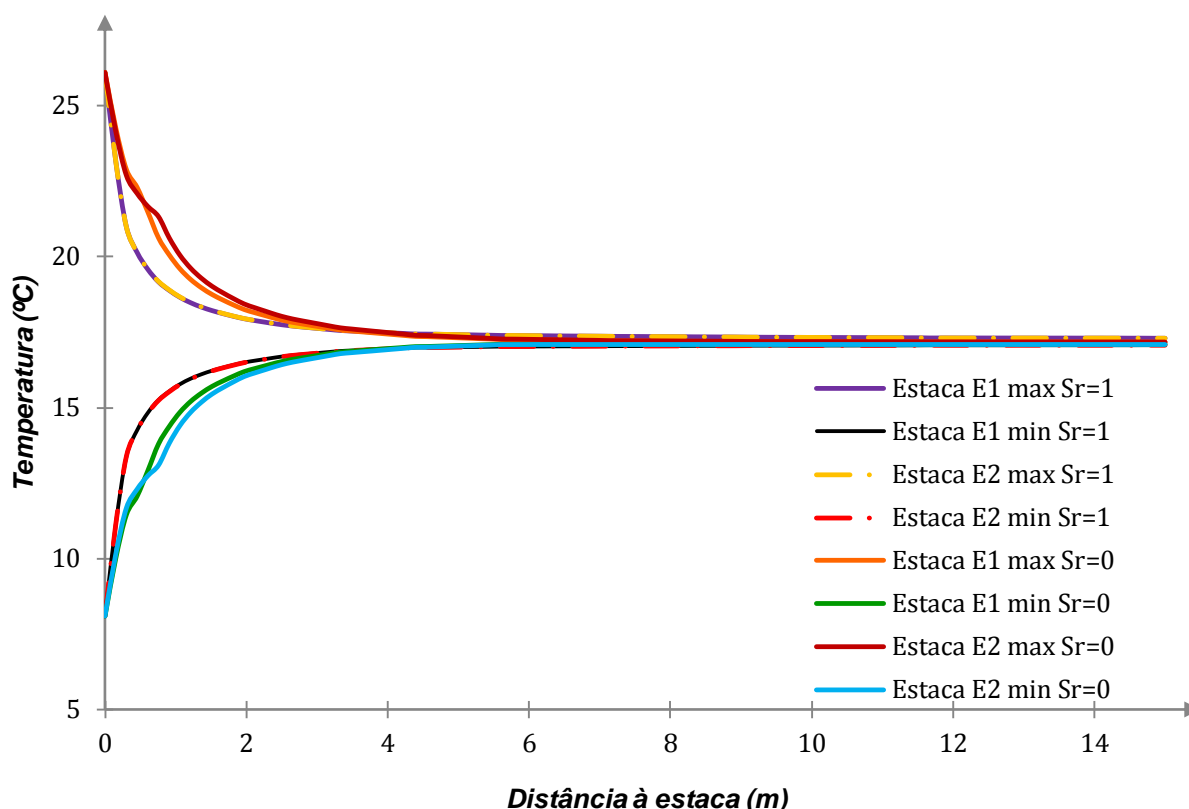


Figura 7.23 Perfil horizontal de temperatura para todas as situações analisadas e acção térmica AT2

Com base na análise dos gráficos é possível concluir que, a uma profundidade de 10m, o funcionamento da estaca provoca variações de temperatura até maior distância no caso do solo seco em qualquer uma das estacas estudadas. De entre os dois diâmetros analisados verifica-se porém, uma distância ligeiramente superior no caso da estaca E2. No caso do solo seco é ainda visível a interface solo-estaca, materializada pelo ressalto observado nas curvas. Este facto é consequência da mudança brusca de condutividade neste local, pois no estado seco as condutividades térmicas do solo e betão apresentam um contraste significativo. Tal facto não é constatável no caso saturado, pois as condutividades térmicas dos dois materiais são semelhantes possibilitando uma homogeneidade no processo de condução de calor. Mais, a resposta do solo saturado exhibe comportamento muito similar, facto objectivamente visível pela sobreposição dos perfis térmicos laterais para os casos de  $S_r=1$ . É ainda possível afirmar que, no caso saturado, a convergência dos perfis para a temperatura natural do solo (sem estaca) é mais rápida, significando isto que para a mesma distância radial, a diferença entre a temperatura máxima e mínima é menor no caso saturado.

A influência da acção térmica é também preponderante, verificando-se no caso da acção AT1 que a distância até onde existe importância do funcionamento da estrutura termoactiva é menor quando comparado com a acção AT2. Essas distâncias são no primeiro caso de 4,5m e no segundo aproximadamente 5,5m para condições de solo seco.

### 7.3.3. Campos de temperatura máxima e mínima

Os campos de temperaturas máxima e mínima induzidos pelo funcionamento da estrutura termoactiva para os diferentes cenários considerados, apresentam-se nas Figuras 7.24 a 7.31. As imagens apresentadas constituem representações contínuas de variação de temperatura, permitindo por isso uma análise mais simples da influência da estrutura termoactiva no campo de temperaturas do solo. Possibilitam ainda, uma compreensão mais clara da influência da variação da saturação do solo, na sua resposta aos carregamentos térmicos.

#### 7.3.3.1 Acção térmica 1 (AT1)

Para o cenário de carregamento térmico na estaca provocado pela acção térmica AT1, foram obtidos os campos de temperaturas apresentados nas Figuras 7.24 a 7.27.

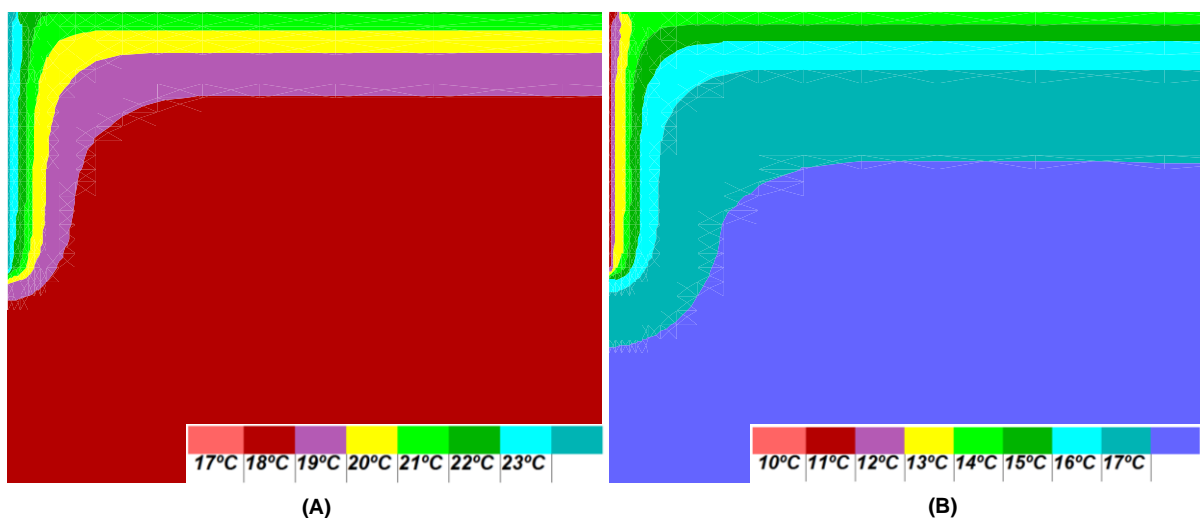


Figura 7.24 Acção térmica AT1 (escala 1:300): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo seco para a estaca E1

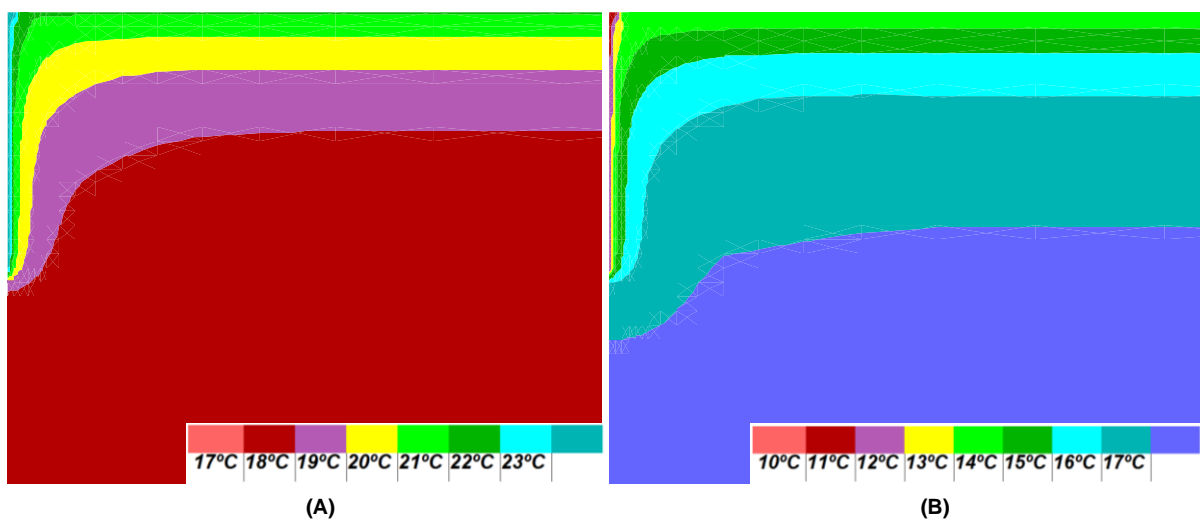


Figura 7.25 Acção térmica AT1 (escala 1:300): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo saturado para a estaca E1



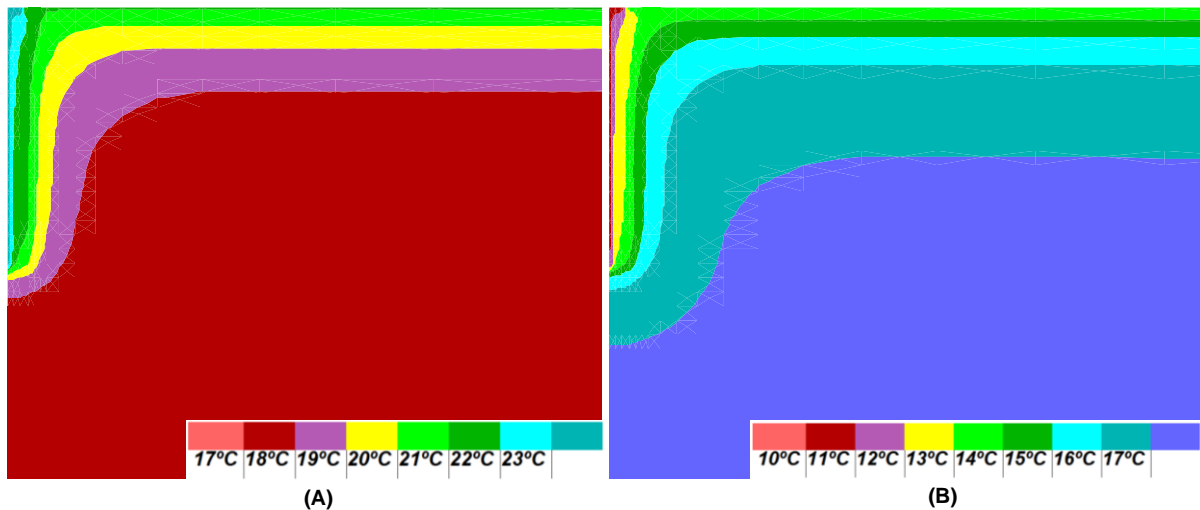


Figura 7.26 Acção térmica AT1 (escala 1:300): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo seco para a estaca E2

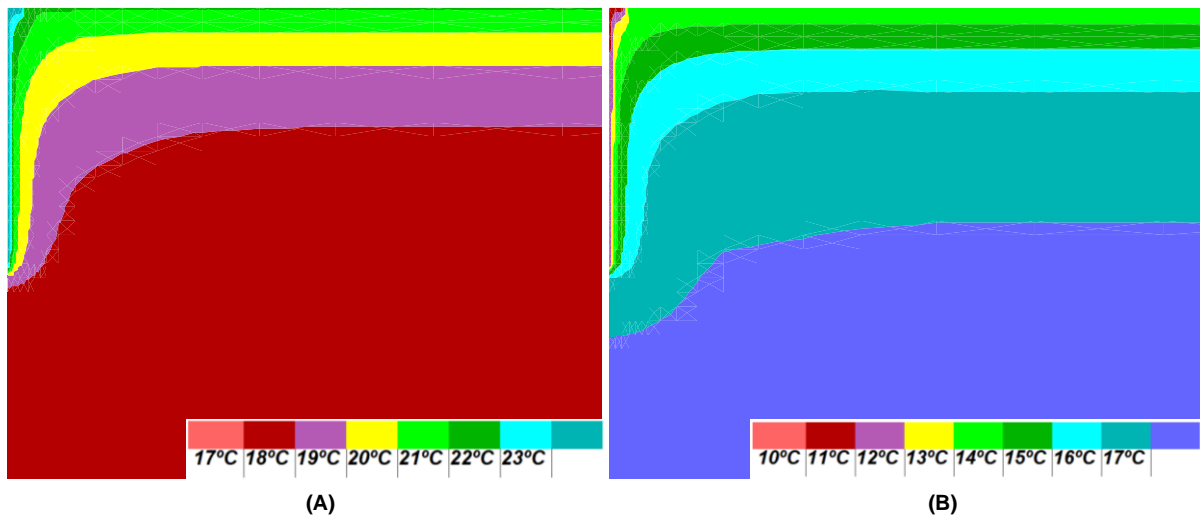


Figura 7.27 Acção térmica AT1 (escala 1:300): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo saturado para a estaca E2

Recorrendo à análise dos campos de temperaturas obtidos em virtude da aplicação do carregamento AT1 ao solo, constata-se que para os cenários de saturação estudados o aumento do diâmetro da estaca tem como resultado apenas variações nos campos de temperatura no caso de  $S_r=0$ . No caso da estaca de menor diâmetro, E1, os gradientes térmicos que se desenvolvem na sua envolvente são superiores, aos verificados em E2 para as mesmas condições de análise numérica. O comportamento anteriormente referido não se verifica no caso do solo totalmente saturado ( $S_r=1$ ). Quanto às profundidades até às quais se verifica variação de temperatura, pode afirmar-se que para ambas as condições de saturação analisadas se verifica maior influencia nos campos mínimos de temperatura.

### 7.3.3.2 Acção térmica 2 (AT2)

Nas Figuras 7.28 a 7.31 são ilustrados os campos de temperatura determinados para o carregamento térmico imposto ao solo, em virtude do funcionamento de uma estrutura termoactiva de fundação.

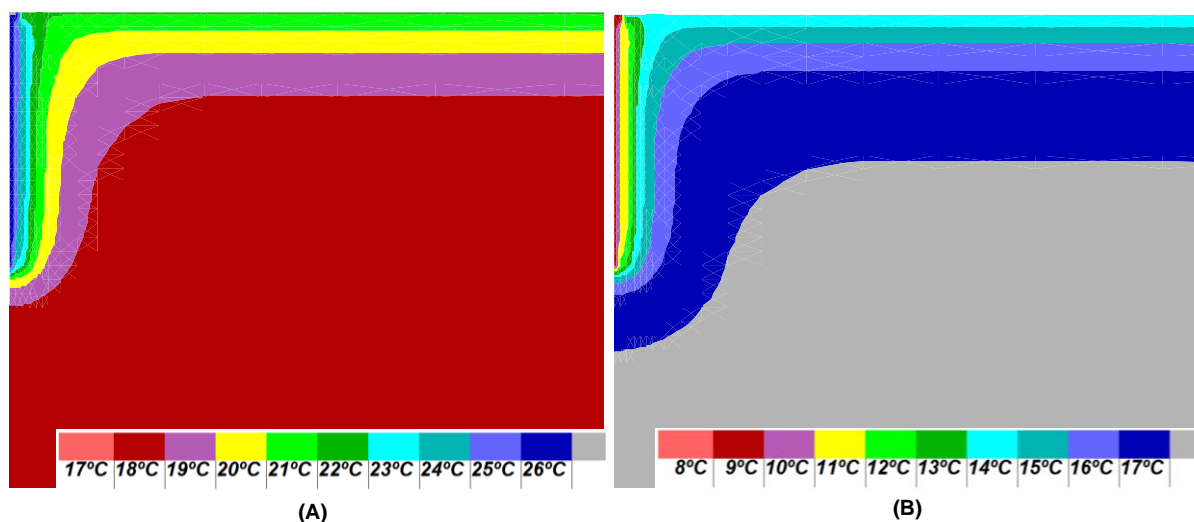


Figura 7.28 Acção térmica AT2 (escala 1:300): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo seco para a estaca E1

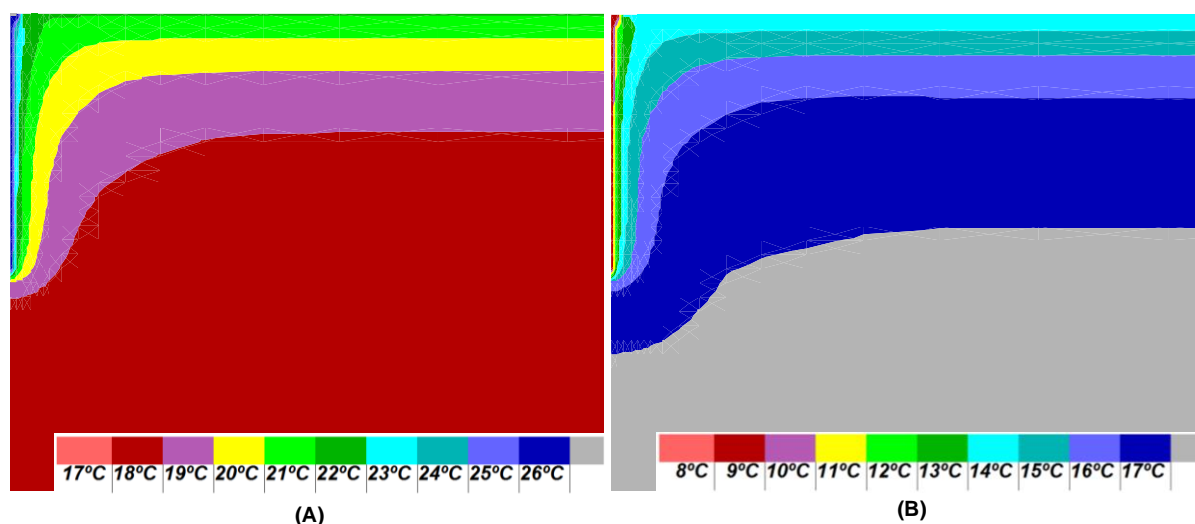


Figura 7.29 Acção térmica AT2 (escala 1:300): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo saturado para a estaca E1

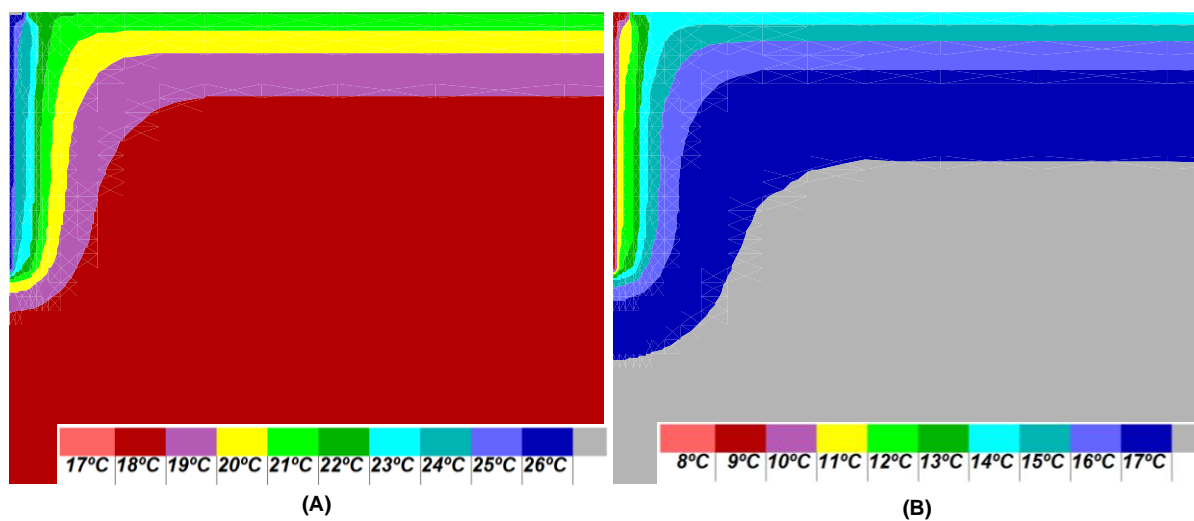


Figura 7.30 Acção térmica AT2 (escala 1:300): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo seco para a estaca E2

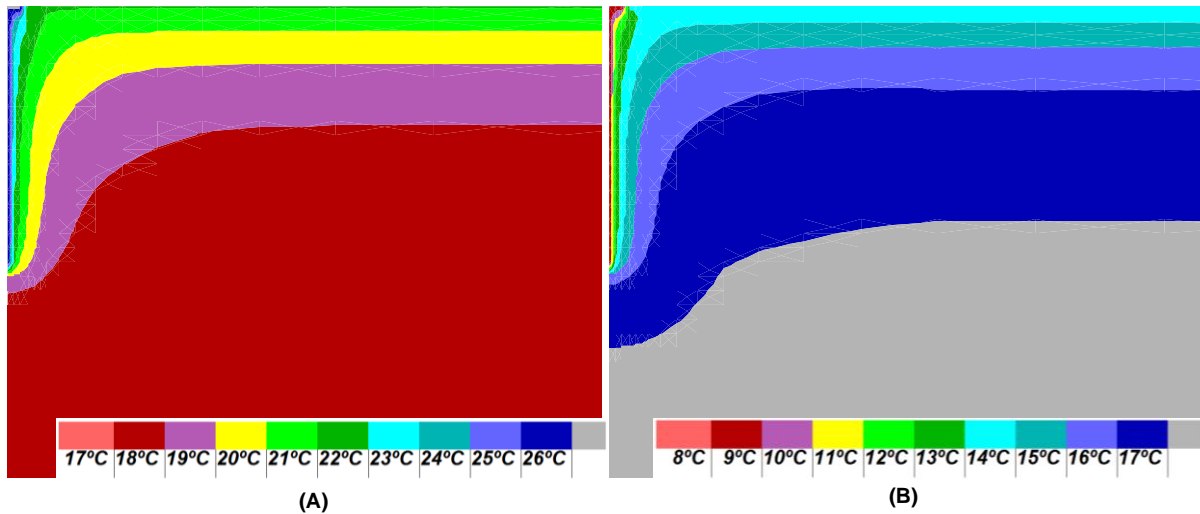


Figura 7.31 Acção térmica AT2 (escala 1:300): (A) Campos de temperatura máxima e (B) mínima do solo saturado para a estaca E2

No presente caso (AT2) os campos de temperatura são similares aos obtidos para o carregamento AT1. Apenas se regista um acréscimo nas amplitudes de variações dos campos de temperatura máximo e mínimo como se pode observar nas escalas de temperatura apresentadas. Tal facto, é resultado da amplitude térmica superior utilizada para a definição da acção térmica dois, aplicada ao solo pela estrutura termoactiva.

#### 7.3.4. Fluxos de calor

A quantidade total de energia permutada pela estrutura termoactiva determinou-se utilizando a equação (3.1). Foram calculados os valores totais de energia térmica transferida para o intervalo de tempo de um ano e quatro anos.

A função taxa de transferência de calor ( $\dot{Q}$ ), foi definida através do ajuste dos pontos obtidos pela análise numérica. Com base nestes valores foi definida a função, utilizando a seguinte expressão:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{med} + \Delta\dot{Q} \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi}{P} \cdot t\right) \quad (7.7)$$

em que  $\dot{Q}_{med}$  é a taxa de média de transferência de calor e  $\Delta\dot{Q}$  a amplitude de variação da taxa de transferência de calor.

Os valores requeridos para definição da função taxa de transferência de calor apresentam-se sintetizados para o caso de AT1 na Tabela 7.6. Na Figura 7.32 apresentam-se os gráficos referentes à variação da energia transferida por unidade de tempo para as estacas E1 e E2, em condições de solo seco e saturado para o referido carregamento.

Tabela 7.6 Parâmetros utilizados para definição das funções taxa de transferência de calor para AT1

Acção Térmica	Estaca	$\dot{Q}_{med}$ (W)	$\Delta\dot{Q}$ (W)	$\bar{P}$ (s)
AT1	E1 $S_r=0$	$-1,79 \cdot 10^{-4}$	39,27	$3,15 \cdot 10^7$
	E2 $S_r=0$	$-7,14 \cdot 10^{-4}$	157,08	
	E1 $S_r=1$	$3,08 \cdot 10^{-5}$	39,27	
	E2 $S_r=1$	$1,23 \cdot 10^{-4}$	157,08	

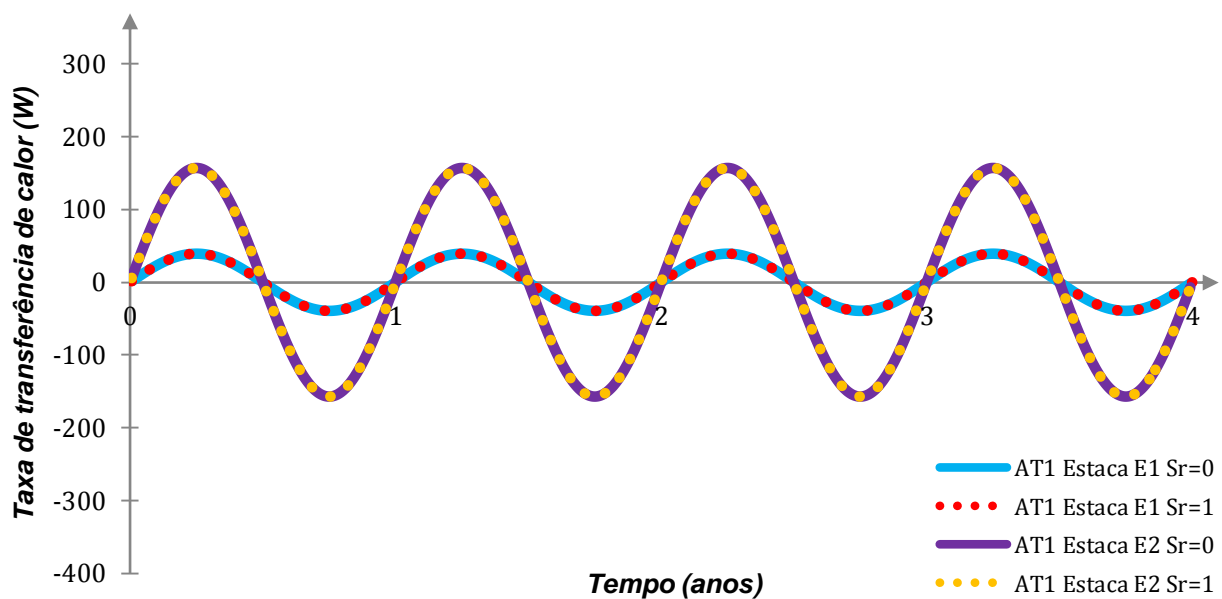


Figura 7.32 Taxa de transferência de calor para a acção térmica AT1

Na Tabela 7.7 são apresentados os parâmetros que definem a função taxa de transferência de calor para a acção térmica AT2. Na Figura 7.33 é ilustrada graficamente a referida função para as condições de análise numérica consideradas.

Tabela 7.7 Parâmetros utilizados para definição das funções taxa de transferência de calor para AT1

Acção Térmica	Estaca	$\dot{Q}_{med}$ (W)	$\Delta\dot{Q}$ (W)	$\bar{P}$ (s)
AT2	E1 $S_r=0$	$-3,57 \cdot 10^{-4}$	78,54	$3,15 \cdot 10^7$
	E2 $S_r=0$	$-1,43 \cdot 10^{-3}$	314,16	
	E1 $S_r=1$	$6,16 \cdot 10^{-5}$	78,54	
	E2 $S_r=1$	$2,46 \cdot 10^{-4}$	314,15	

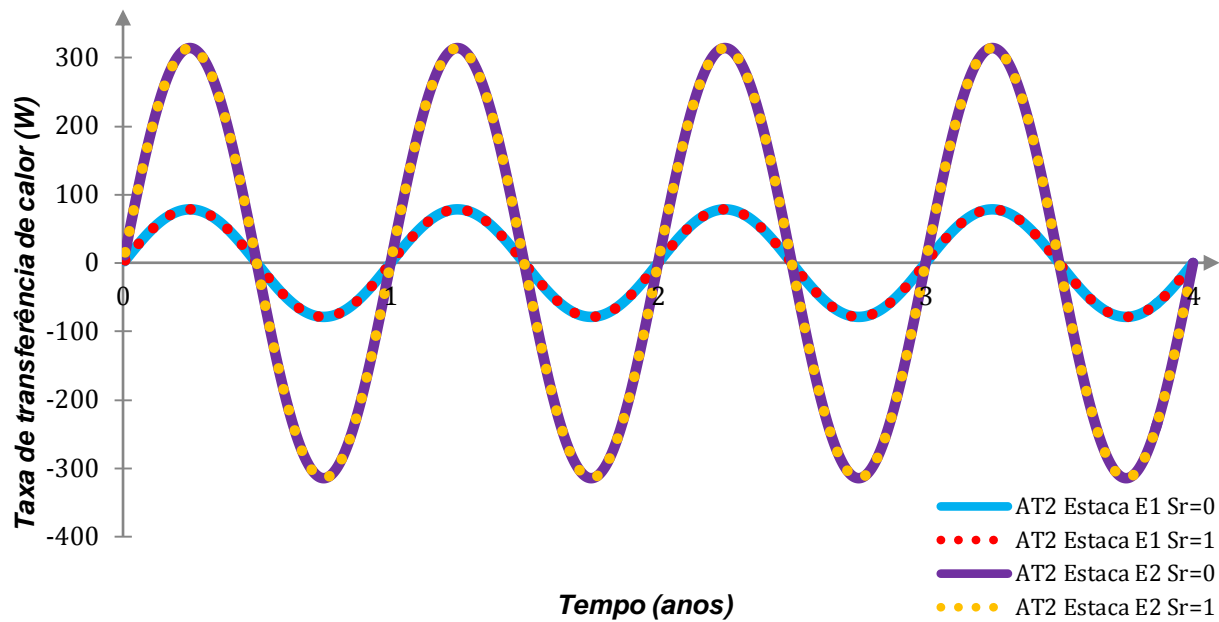


Figura 7.33 Taxa de transferência de calor para a acção térmica AT2

Pela análise dos gráficos conclui-se que para o caso da acção térmica AT2 são obtidos fluxos térmicos superiores quando comparados com AT1. Este facto resulta do maior gradiente térmico estabelecido entre a estaca e o solo.

Na Tabela 7.8 apresentam-se os valores totais de energia térmica utilizados para climatização, mediante as solicitações AT1 e AT2, para o período de um e quatro anos.

Tabela 7.8 Quantidades totais de energia transferida

Acção Térmica	Condições	$Q$ (1 ano) (kW·h)	$Q$ (4 anos) (kW·h)
AT1	E1 $S_r=0$	188,42	753,67
	E2 $S_r=0$	753,66	3014,66
	E1 $S_r=1$	188,42	753,75
	E2 $S_r=1$	753,74	3014,98
AT2	E1 $S_r=0$	376,83	1507,56
	E2 $S_r=0$	1507,33	6029,33
	E1 $S_r=1$	376,89	1507,56
	E2 $S_r=1$	1507,49	6029,95

Com base nos resultados expostos na Tabela 7.8 é possível concluir que as quantidades de energia transferida durante o período das análises numéricas são maiores no caso da acção térmica AT2. Este aumento é resultado da variação no gradiente térmico, que por ser superior no caso de AT2 provoca, segundo a Lei de Fourier, um aumento no fluxo de calor.

Observa-se ainda que o aumento do diâmetro da estaca potencia uma amplificação na quantidade de energia permutada durante o período em análise. Quantitativamente é possível afirmar que, para o caso de estudo, a energia transferida quadruplica face ao aumento no diâmetro da estaca em ambos o carregamento térmicos considerados. A saturação, por sua vez, influencia ainda que de forma pouco pronunciada a quantidade de energia transferida. Em ambos os cenários de carregamento térmico (AT1 e AT2), observam-se maiores trocas energéticas para o solo no saturado.

Quantitativamente a energia transferida para o caso do carregamento AT1 foi, no caso da estrutura termoactiva E1, de 188,42kW·h para  $S_r=0$  e 188,44kW·h para  $S_r=1$ . Para a estaca de maior diâmetro, E2, a quantidade total de calor transferido foi de 753,66kW·h para o caso seco e 753,74kW·h para o solo totalmente saturado. Para a acção térmica AT2, a estaca de menor diâmetro forneceu no caso seco 376,83kW·h e no caso saturado 376,89kW·h. Por fim a estaca E2, permitiu trocas de energia no caso de seco de valor igual a 1507,33kW·h e no caso saturado de 1507,487kW·h. Estas diferenças pouco pronunciadas para a mesma estaca são função da diferença entre as condutividades térmicas no estado seco e saturado. Para diferenças mais pronunciadas naquela propriedade térmica, obter-se-iam diferenças mais marcadas entre a energia total transferida no caso seco e saturado.

#### 7.4. Apreciação dos resultados

As análises numéricas realizadas no presente capítulo tiveram como objectivo o estudo do comportamento do solo face a diferentes acções térmicas. Em primeiro lugar foi estudada a resposta do solo às variações anuais de temperatura atmosférica, sendo depois analisada a influência de uma estrutura termoactiva de fundação.

No primeiro caso, o estudo realizou-se tendo como base os parâmetros climatológicos disponíveis na bibliografia para três cidades portuguesas. O solo considerou-se homogéneo e isotrópico, apresentando propriedades térmicas invariáveis no tempo. Estes pressupostos foram também assumidos para os estudos numéricos realizados com uma estrutura termoactiva de fundação (estaca). Optou-se então pela introdução no modelo, de uma estaca para a qual se consideraram dois diâmetros. A estaca de betão impôs ao solo duas acções térmicas distintas que variaram em fase com a temperatura atmosférica à superfície, apresentando porém amplitudes térmicas superiores.

Os resultados numéricos obtidos para o caso do solo sem estrutura termoactiva, são compatíveis com os obtidos através de soluções analíticas como a apresentada em Hillel (1998). Pela análise dos gráficos ilustrados nas Figuras 7.4 a 7.9 é possível concluir que a oscilação de temperatura em profundidade ocorre fora de fase, sendo a diferença relativamente à onda superficial tanto maior

quanto maior a profundidade. A variação ocorre também em amplitude, sendo esta sucessivamente menor com o aumento da profundidade até se anular.

No que concerne aos resultados obtidos com a estrutura termoactiva, torna-se evidente que para os dois diâmetros estudados, a influência da dimensão da secção não é significativa. Para ambas as acções térmicas, observam-se perfis térmicos verticais idênticos, quando comparados para igual situação de saturação. Por outro lado, quando comparada a influência da saturação, observam-se mudanças significativas nos perfis. No caso do solo seco, as curvas exibem maior afastamento, ou seja, a influência radial do carregamento térmico imposto pela estaca verifica-se até maior distância. Tal facto pode explicar-se pelas diferenças conjuntas de condutividade térmica e calor específico do solo para os dois cenários de saturação estudados. O solo quando saturado exibe maior calor específico e condutividade térmica. O aumento do primeiro resulta numa maior quantidade de energia necessária para que a mesma massa de solo aumente um grau de temperatura, comparativamente ao estado saturado. De modo recíproco, a quantidade de calor que é necessário retirar ao solo para que este reduza a sua temperatura em um grau é também é maior. Por outro lado, a condutividade superior comparativamente ao estado seco, possibilita uma maior quantidade de energia dissipada ou fornecida à estaca.

A quantidade total de energia permutada entre o solo e a estrutura termoactiva revelou ser dependente da acção térmica, diâmetro e estado de saturação do solo. Face aos dois carregamentos térmicos estudados, verificou-se que a quantidade de energia transferida é tanto maior quanto maior for a amplitude do carregamento térmico imposto. O diâmetro da estaca foi também motivo de estudo, observando-se que os aumentos deste parâmetro geométrico possibilitam uma maior quantidade de energia transferida. Por fim, é ainda possível afirmar que a saturação pode determinar, ainda que de forma menos expressiva, a quantidade de energia permutada. Para os cenários estudados, verificaram-se aumentos na quantidade de energia transferida quando se impôs ao solo um aumento no seu grau de saturação.

Os estudos realizados consideraram apenas condução de calor. Deste facto resulta a não consideração de transferência por convecção. Este mecanismo, no caso de  $S_r=1$ , pode desempenhar um papel considerável que segundo alguns autores não deve ser desprezado. Outro dos factores que pode influenciar negativamente os resultados obtidos, prende-se com a variação do grau de saturação dos solos ao longo do ano. A consideração das oscilações anuais deste índice físico permitiria avaliações mais realistas do comportamento térmico do solo. Por fim, há que atentar ao facto de no caso saturado, terem sido realizadas análises numéricas tendo por base resultados empíricos. Estas formulações como já referido, não imprimem aos valores das propriedades o valor realista desejável quando se trata do projecto e dimensionamento de empreendimentos do tipo GES. Desta forma, torna-se evidente a necessidade de no futuro realizar estudos numéricos considerando apenas resultados obtidos em laboratório ou *in situ*, para que os modelos obtido se aproximem ao máximo das condições locais de implementação.

## 8. Considerações finais

A presente dissertação teve como objectivo a caracterização térmica de um solo e posterior modelação numérica, tendo em vista a compreensão do seu comportamento térmico face à imposição de diferentes gradientes térmicos por parte de uma estrutura termoactiva de fundação.

Em primeiro lugar adquiriu-se o estado da arte, obtendo-se conhecimentos base acerca dos tipos de sistemas GES, dos mecanismos de transferência de calor e das propriedades necessárias para a sua definição. Foram ainda compilados os meios mais correntes de determinação das propriedades térmicas dos solos, especialmente da condutividade, tanto em laboratório como *in situ*.

Em segundo lugar, conhecidos os mecanismos de transferência, propriedades térmicas e meios de determinação, procedeu-se à caracterização térmica experimental em laboratório de um solo específico. Por forma a averiguar a fiabilidade do dispositivo foi utilizado um material de referência para o qual se determinou a condutividade térmica. Os resultados obtidos foram então comparados com outros disponíveis na bibliografia. Seguiu-se a caracterização geotécnica e térmica do solo, estes estudos iniciaram-se com ensaios de identificação e caracterização geotécnica a que se seguiu a caracterização térmica pelo *Hot Wire Method*. Foram realizados ensaios sob amostras secas e húmidas, determinando-se a sua condutividade térmica e peso volúmico respectivo.

Nos ensaios realizados em provetes de glicerina (material de referência neste estudo) obtiveram-se valores compatíveis, ainda que ligeiramente superiores, com os disponíveis na bibliografia, concluindo-se então que o dispositivo é adequado para a determinação da condutividade térmica. Verificou-se ainda que para as duas câmaras de ensaio utilizadas durante a caracterização do material de referência, os resultados obtidos são idênticos, apresentando porém incertezas associadas díspares. Por este facto optou-se pela utilização da câmara de ensaio de aço inoxidável durante as fases seguintes, por esta apresentar menor incerteza nos resultados comparativamente à câmara acrílica. Durante o período de trabalhos foram sentidas dificuldades ao nível da selagem da base das câmaras, tendo existido em alguns casos interferência da glicerina nas ligações entre a unidade de aquecimento e os fios provenientes da fonte de energia eléctrica.



No que concerne aos resultados obtidos para os provetes de solo, há que considerar dois cenários diferentes correspondentes a ensaios realizados com  $\omega = 0$  e  $\omega \neq 0$ . No primeiro caso os resultados revelaram-se compatíveis com os valores de referência disponíveis na norma alemã VDI 4640. Os ensaios decorreram com normalidade, apesar de ligeiras dificuldades relacionadas com a colocação do provete de solo na câmara e sua compactação. Em dois deles, as condições de peso volúmico, índice de vazios e porosidade foram idênticas atingindo-se valores similares de condutividade térmica, o que permite concluir acerca da sua repetibilidade. No que se refere aos solos com teor em água diferente de zero os resultados foram substancialmente piores. Obtiveram-se valores díspares, que em alguns casos se incompatibilizam com o conhecimento teórico exposto nos capítulos iniciais desta dissertação. A repetição do ensaio de provetes com igual peso volúmico, porosidade e índice de vazios não foi possível, o que impossibilitou concluir acerca da sua repetibilidade. No decorrer dos trabalhos foram ainda sentidas grandes dificuldades no que se refere à homogeneidade do teor em água do solo que constituía o provete. A migração da água intersticial durante o período de medição foi verificada para todos os ensaios, observando-se acumulação da fase líquida na zona inferior do provete. Os resultados obtidos revelaram ainda uma mudança de comportamento, no que diz respeito às curvas de variação de temperatura em função do logaritmo do tempo. Este facto é resultado da influência das condições de fronteira na zona de medição.

Por fim, procedeu-se à modelação numérica por diferenças finitas do comportamento térmico do solo. Primeiro sem introdução de qualquer estrutura termoactiva e depois utilizando uma estaca. No primeiro caso foram executadas análises numéricas com acção térmica à superfície, compatível com as condições climatológicas de três cidades portuguesas, Lisboa, Porto e Beja. No segundo caso, o comportamento térmico foi estudado para dois carregamentos térmicos distintos, para cada um dos quais foram estudados dois diâmetros de estaca, sob condições de  $S_r = 0$  e  $S_r = 1$ .

O comportamento térmico do solo face à acção térmica imposta pela temperatura à superfície revelou-se similar para as três cidades estudadas. Em todos os casos as profundidades de influência foram semelhantes, verificando-se porém maior influência da temperatura à superfície para o solo saturado. A variação da temperatura em profundidade apresenta comportamento fora de fase relativamente à sua oscilação à superfície. A amplitude térmica é sucessivamente mais pequena com a profundidade até dado valor, convergindo para a temperatura média anual à superfície. Esta zona designada como homotérmica é no caso do solo seco atingida, para as acções impostas, perto dos 10m de profundidade. No caso saturado, verificam-se profundidades de influência superiores, situando-se a zona homotérmica abaixo dos 15m de profundidade.

Nos casos estudados com introdução de uma única estrutura termoactiva verificaram-se variações de comportamento em função do estado de saturação, geometria da estaca e acção térmica imposta. Os campos de temperaturas obtidos pela acção dos carregamentos térmicos aplicados à estaca são idênticos, obtendo-se contudo extremos de temperatura maiores no caso da AT2.

A variação de temperatura segundo a direcção radial apresenta diferença em função do grau de saturação para ambas as acções térmicas impostas, sendo maior no caso da acção térmica AT2. O

solo, quando saturado, apresenta menor variação de temperatura face aos diferentes carregamentos térmicos aplicados à estaca. Este facto é observável tanto nos perfis verticais de temperatura como nos horizontais.

No que diz respeito à geometria, onde apenas se fez variar o diâmetro, observaram-se diferenças na resposta do solo para o caso seco. Neste cenário, o aumento do diâmetro da estaca provoca uma diminuição nos gradientes de temperatura em seu redor. Tal facto é constatável nos campos de temperaturas apresentados.

As quantidades totais de energia transferida revelaram dependência directa da amplitude térmica do carregamento, da geometria da estaca e do grau de saturação do solo. Concluiu-se com base nos resultados obtidos, que o aumento da amplitude térmica da acção provoca um aumento nas quantidades de energia transferida, à semelhança do que acontece também com o diâmetro da estaca. Este ao ser incrementado possibilita maior quantidade de energia transferida. Por fim, o grau de saturação revelou também condicionar o calor total transferido. Neste caso, existe também um aumento ligeiro de  $Q$  com a variação positiva de  $S_r$ .

Os estudos práticos realizados nesta dissertação foram em parte condicionados por factores relacionados com o tempo disponível, bem como com algumas opções logísticas tomadas que decerto hoje seriam necessariamente reequacionadas. A componente experimental foi sem dúvida a mais prejudicada, em virtude das dificuldades sentidas no que concerne à disponibilidade de equipamento. A impossibilidade de aquisição de um dispositivo levou à utilização já tardia de um desenvolvido e montado pela ESTIG. Este por ser montado *in loco*, apresentava alguns problemas, parte deles solucionados, ou parcialmente solucionados, no decorrer desta dissertação. Destaca-se a câmara de ensaio desenvolvida pelo autor, que permitiu em parte a melhoria das condições de ensaio e dos resultados obtidos. Assim é necessário alertar para o facto de algum tempo ter sido despendido na melhoria do dispositivo, tempo este não reflectido de forma clara nesta dissertação, mas que decerto foi fulcral para a obtenção dos resultados apresentados e para a posterior utilização do dispositivo montado em trabalhos de investigação futuros.

No que se refere aos estudos futuros propõem-se os seguintes desenvolvimentos:

- Melhoramento do dispositivo de ensaio em particular da unidade de aquecimento, sistema de medição e câmara de ensaio;
- Normalização do procedimento de ensaio pelo HWM;
- Realização de ensaios conducentes à determinação por via experimental do calor específico do solo (método do calorímetro);
- Realização de ensaios em provetes de outros tipos de solos testando também diferentes graus de saturação, compacidades, composições mineralógicas;

- Análise da influência das diferentes propriedades geotécnicas, designadamente do grau de saturação, na condutividade térmica e calor específico do solo;
- Realização de *Thermal Response Tests*;
- Estudo do comportamento térmico dos betões utilizados em estruturas termoactivas, nomeadamente no que se refere à influência dos seus diferentes constituintes;
- Estudo do comportamento termomecânico das diferentes estruturas termoactivas de fundação;
- Modelação numérica do comportamento térmico e mecânico dos solos face às acções térmicas impostas pelas diversas estruturas termoactivas.

## Referências Bibliográficas

- Abu-Hamdeh, N. (2001). Measurement of thermal conductivity of sandy loam and clay loam soils using single dual probes. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 80(2), 209–216. doi:10.1006/jaer.2001.0730
- Abu-Hamdeh, N. (2003). Thermal properties of soils as affected by density and water content. *Biosystems Engineering*, 86(1), 97–102. doi:10.1016/S1537-5110(03)00112-0
- Abu-Hamdeh, N. H., e Reeder, R. C. (2000). Soil Thermal Conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 64(4), 1285. doi:10.2136/sssaj2000.6441285x
- Abu-Hamdeh, N., Khdair, A., e Reeder, R. (2001). A comparison of two methods used to evaluate thermal conductivity for some soils. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(5), 1073–1078. doi:10.1016/S0017-9310(00)00144-7
- ADENE. (2013). *Guia da eficiência energética* (p. 94). Algés: ADENE.
- Al-Hadhrani, L., e Ahmad, A. (2009). Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia. *Applied Thermal Engineering*, 29(5-6), 1123–1130. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.06.003
- Alnefaie, K., e Abu-Hamdeh, N. (2013). Specific heat and volumetric heat capacity os some Saudian soils as affected by moisture and density. In *Proceedings of the 2013 International Conference on Mechanics, Fluids, Heat, Elasticity and Electromagnetic Fields* (pp. 139–143).
- Antics, M., Bertani, R., e Sanner, B. (2013). Summary of EGC 2013 country update reports on geothermal energy in Europe. In *European Geothermal Congress 2013* (pp. 1–18). Pisa.

- ASTM C177-10. (2010). *Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate*. West Conshohocken: ASTM Internacional. doi:10.1520/C0177-10.2
- ASTM C518-10. (2010). *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*. West Conshohocken: ASTM Internacional. doi:10.1520/C0518-10.approaches
- ASTM D4611-08. (2008). *Standard Test Method for Specific Heat of Rock and Soil*. West Conshohocken: ASTM Internacional. doi:10.1520/D4611-08
- ASTM D5334-05. (2005). *Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. West Conshohocken: ASTM Internacional.
- ASTM E1225-09. (2009). *Standard Test Method for Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded- Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique* (pp. 1–9). West Conshohocken: ASTM Internacional. doi:10.1520/E1225-09.2
- Banks, D. (2012). *An Introduction to Thermogeology: Ground Source Heating and Cooling*. Oxford, UK: Wiley-Blackwell. doi:10.1002/9781118447512
- Barry-Macaulay, D., Bouazza, A., Singh, R., Wang, B., e Ranjith, P. (2013). Thermal conductivity of soils and rocks from the Melbourne (Australia) region. *Engineering Geology*, 164, 131–138. doi:10.1016/j.enggeo.2013.06.014
- Beier, R., Acuña, J., Mogensen, P., e Palm, B. (2013). Borehole resistance and vertical temperature profiles in coaxial borehole heat exchangers. *Applied Energy*, 102, 665–675. doi:10.1016/j.apenergy.2012.08.007
- Bentz, D. (2007). Transient plane source measurements of the thermal properties of hydrating cement pastes. *Materials and Structures*, 40(10), 1073–1080. doi:10.1617/s11527-006-9206-9
- Bording, T., Balling, N., e Nielsen, S. (2013). Laboratory measurements of rock thermal properties by needle probe and transient divided bar. In *European Geothermal Congress 2013* (pp. 1–4). Pisa.
- Bouazza, A., e Adan, D. (2012). Turning geostructures into sources of renewable energy. In *11th Australia-New Zealand Conference on Geomechanics Ground Engineering in a Changing World* (pp. 1051–1056). Australian Geomechanical Society and New Zealand Geotechnical Society.
- Bourne-Webb, P., e Bodas-Freitas, T. (2009). Considerações geotécnicas no dimensionamento e exploração de fundações com aproveitamento geotérmico. In *XIII Congresso Nacional de Geotecnia*. Lisboa.

- Brandl, H. (2006). Energy foundations and other thermo-active ground structures. *Géotechnique*, 56(2), 81–122. doi:10.1680/geot.2006.56.2.81
- Bristow, K. (1998). Measurement of thermal properties and water content of unsaturated sandy soil using dual-probe heat-pulse probes. *Agricultural and Forest Meteorology*, 89(2), 75–84. doi:10.1016/S0168-1923(97)00065-8
- Bristow, K., Kluitenberg, G., Goding, C., e Fitzgerald, T. (2001). A small multi-needle probe for measuring soil thermal properties, water content and electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, 31(3), 265–280.
- Çengel, Y. (2003). *Heat Transfer-A Practical Approach* (2ª edição.). McGraw-Hill.
- Chamorro, C., García-Cuesta, J., Mondéjar, M., e Pérez-Madrado, A. (2014). Enhanced geothermal systems in Europe: an estimation and comparison of the technical and sustainable potentials. *Energy*, 65, 250–263. doi:10.1016/j.energy.2013.11.078
- Clarke, B., Agab, A., e Nicholson, D. (2008). Model specification to determine thermal conductivity of soils. *Proceedings of the ICE - Geotechnical Engineering*, 161(3), 161–168. doi:10.1680/geng.2008.161.3.161
- Coment, E., Fudym, O., Ladevie, B., e Batsale, J. (2006). Inverse Problems in Science and Engineering Extension of the hot wire method to the characterization of stratified soils with multiple temperature analysis, (April 2013), 37–41.
- Cosenza, P., Guérin, R., e Tabbagh, A. (2003). Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modelling. *European Journal of Soil Science*, 54, 581–587.
- Côté, J., e Konrad, J. (2005). A generalized thermal conductivity model for soils and construction materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 42(2), 443–458. doi:10.1139/T04-106
- Deng, Z., Rees, S., e Spitler, J. (2005). A model for annual simulation of standing column well ground heat exchangers. *HVAC Research*, 11(4), 637–655. doi:10.1080/10789669.2005.10391159
- Diao, N., Li, Q., e Fang, Z. (2004). Heat transfer in ground heat exchangers with groundwater advection. *International Journal of Thermal Sciences*, 43(12), 1203–1211. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2004.04.009
- Dickinson, J., Buik, M., e Snijders, A. (2009). Aquifer thermal energy storage: theoretical and operational analysis. *Géotechnique*, 59(3), 249–260.

- Drefke, C., Stegner, J., e Sass, I. (2013). Changes of thermophysical and hydraulic properties in unsaturated soils caused by heat transfer. In *European Geothermal Congress 2013* (pp. 1–5). Pisa.
- European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling. (2011). *Common Vision for the Renewable Heating and Cooling Sector in Europe*. Brussels: European Technology Platform. doi:10.2788/20474
- European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling. (2012). *Strategic Research Priorities for Geothermal Technology*. Brussels: European Technology Platform.
- Farouki, O. (1981). *Thermal Properties of Soils. Highway Research Board Special Report*. New Hampshire: United States Army Corps of Engineers-Cold Regions Research and Engineering Laboratory.
- Franco, A. (2007). An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method. *Applied Thermal Engineering*, 27(14-15), 2495–2504. doi:10.1016/j.applthermaleng.2007.02.008
- Fricke, B., Misra, A., Becker, B., e Stewart, J. (1992). Soil thermal conductivity: effects of saturation and dry Density. In *Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Buildings V* (pp. 158–165). Atlanta: ASHRAE.
- Fröb, K. (2011). *Measuring and modeling of soil thermal properties and ground heat flux at two different sites at Lena Delta, Siberia*. Universität Leipzig.
- Gehlin, S. (2002). *Thermal Response Test*. Luleå University of Technology.
- Gehlin, S., e Nordell, B. (2003). Determining undisturbed ground temperature for thermal response test. *ASHRAE Transactions*, 109 PART 1, 151–156.
- Glycerine Producers Association. (1963). *Physical properties of glycerine and its solutions* (p. 14). New York: Glycerine Producers Association.
- Gori, F., e Corasaniti, S. (2013). New model to evaluate the effective thermal conductivity of three-phase soils. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 47, 1–6. doi:10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.07.004
- Gunn, D. A., Jones, L. D., Raines, M. G., Entwisle, D. C., e Hobbs, P. R. N. (2005). Laboratory Measurement and Correction of Thermal Properties for Application to the Rock Mass. *Geotechnical and Geological Engineering*, 23(6), 773–791. doi:10.1007/s10706-003-3156-6

- Gustafsson, S. (1991). Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials. *Review of Scientific Instruments*, 62(3), 797. doi:10.1063/1.1142087
- Halliday, D., Resnick, R., e Walker, J. (2012). *Fundamentos de Física* (9ª edição.). Rio de Janeiro: LTC.
- Hammerschmidt, U., e Sabuga, W. (2000). Transient hot wire (THW) method: uncertainty assessment. *International Journal of Thermophysics*, 21(6), 1255–1278.
- Hellström, G., e Gehlin, S. (2000). Recent status of in-situ thermal response tests for BTES applications in Sweden. In *Proceedings Terrastock 2000* (pp. 1–6). Stuttgart.
- Hemmingway, P., e Long, M. (2012). Interpretation of In Situ and Laboratory Thermal Measurements Resulting in Accurate Thermogeological Characterization. In *Geotechnical and Geophysical Characterization 4 (ISC 4)* (Vol. 4, pp. 1779–1787). London: Taylor e Francis Group.
- Hillel, D. (1998). Soil Temperature and Heat Flow. In *Environmental Soil Physics* (2ª edição., pp. 309–334). London: Academic Press.
- ISO/DIS 17628. (2013). *Geothermal investigation and testing-Geothermal testing-Determination of thermal conductivity of soil and rock using a borehole heat exchanger (draft)*. Geneva: Internantational Organization for Standardization.
- Itasca. (2011). *FLAC-Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 7.0 User's Manual*. Minneapolis: Itasca Consulting Group.
- Jewett, S. (2004). *Physics for Scientists and Engineers With Modern Physics* (6ª edição). Belmont: Thomson.
- Johnston, I., Narsilio, G., e Colls, S. (2011). Emerging geothermal energy technologies. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15(4), 643–653. doi:10.1007/s12205-011-0005-7
- Jowkar, B., Leong, W., e Rosen, M. (2013). A study of the effect of variation in soil thermal conductivity on a ground source heat pump system. In *EIC Climate Change Technology Conference*. Montreal.
- Khan, M. . (2002). Factors affecting the thermal properties of concrete and applicability of its prediction models. *Building and Environment*, 37(6), 607–614. doi:10.1016/S0360-1323(01)00061-0
- Kluitenberg, G., Das, B., e Bristow, K. (1995). Error Analysis of Heat Pulse Method for Measuring Soil Heat Capacity, Diffusivity, and Conductivity. *Soil Science Society of America Journal*, 59(3), 719. doi:10.2136/sssaj1995.03615995005900030013x



- Knight, J., e Kluitenberg, G. (2013). Correcting for finite probe diameter in the dual probe heat pulse method of measuring soil water content. In *20th International Congress on Modelling and Simulation* (pp. 127–133). Adelaide.
- Kodikara, J., Rajeev, P., e Rhoden, N. (2011). Determination of thermal diffusivity of soil using infrared thermal imaging. *Canadian Geotechnical Journal*, 48(8), 1295–1302. doi:10.1139/T11-036
- Laloui, L., e Di Donna, A. (2013). *Energy Geostructures: Innovation in Underground Engineering*. Hoboken: Wiley and Sons.
- Lawrence, D., e Slater, A. (2008). Incorporating organic soil into a global climate model. *Climate Dynamics*, 30(2-3), 145–160.
- Lee, K. (2013). *Underground Thermal Energy Storage*. London: Springer London. doi:10.1007/978-1-4471-4273-7
- Lienhard IV, J., e Lienhard V, J. (2008). *A Heat Transfer Text Book* (3ª edição). Massachusetts: Phlogiston Press.
- Liu, G., e Si, B. (2011). Soil ice content measurement using a heat pulse probe method. *Canadian Journal of Soil Science*. doi:10.4141/CJSS09120
- Loveridge, F. (2012). *The thermal performance of foundation piles used as heat exchangers in ground energy systems*. University of Southampton.
- Loveridge, F., Brettmann, T., Olgun, G., e Powrie, W. (2014). Assessing the applicability of thermal response testing to energy piles. In *DFI-EFFC International Conference on Piling and Deep Foundations* (Vol. 0044). Stockolm.
- Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics* (pp. 220–252). New York: Cambridge University Press.
- Lund, J., Freeston, D., e Boyd, T. (2011). Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review. *Geothermics*, 40(3), 159–180.
- Madureira, P., e Antunes, P. (2012). Geotermia de muito baixa entalpia. Razões e vantagens do seu aproveitamento. *Geonovas*, 25, 27–33.
- Malinarič, S. (2013). Contribution to the Transient Plane Source Method for Measuring Thermophysical Properties of Solids. *International Journal of Thermophysics*, 34(10), 1953–1961. doi:10.1007/s10765-013-1502-3
- Markiewicz, R., e Adam, D. (2009). Energy from earth-coupled structures, foundations, tunnels and sewers. *Géotechnique*, 59(3), 229–236. doi:10.1680/geot.2009.59.3.229

- Matos Fernandes, M. (2011). *Mecânica dos Solos-Conceitos e Princípios Básicos* (2ª edição). Porto: FEUP edições.
- Mattsson, N., Steinmann, G., e Laloui, L. (2008). Advanced compact device for the in situ determination of geothermal characteristics of soils. *Energy and Buildings*, 40(7), 1344–1352. doi:10.1016/j.enbuild.2007.12.003
- McCorry, M., e Jones, G. (2011). *Geotrained Training Manual for Designers of Shallow Geothermal Systems* (pp. 1–187). Brussels: GEOTRAINET.
- Merckx, B., Dudoignon, P., Garnier, J. P., e Marchand, D. (2012). Simplified Transient Hot-Wire Method for Effective Thermal Conductivity Measurement in Geo Materials: Microstructure and Saturation Effect. *Advances in Civil Engineering*, 2012(1), 1–10. doi:10.1155/2012/625395
- Moel, M., Bach, P., Bouazza, A., Singh, R., e Sun, J. (2010). Technological advances and applications of geothermal energy pile foundations and their feasibility in Australia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 2683–2696. doi:10.1016/j.rser.2010.07.027
- Mortensen, A., Hopmans, J., Mori, Y., e Šimůnek, J. (2006). Multi-functional heat pulse probe measurements of coupled vadose zone flow and transport. *Advances in Water Resources*, 29(2), 250–267. doi:10.1016/j.advwatres.2005.03.017
- Nibe Energy Systems. (2009). *A new generation of heat pumps* (pp. 6–7). Chesterfield: Nibe.
- Nikolaev, I. (2007). An experimental study of soil thermal conductivity using a guarded hot plate apparatus.
- Nikolaev, I., Leong, W., e Rosen, M. (2013). Experimental Investigation of Soil Thermal Conductivity Over a Wide Temperature Range. *International Journal of Thermophysics*, 34(6), 1110–1129. doi:10.1007/s10765-013-1456-5
- NP EN 12667. (2012). *Desempenho térmico de materiais e produtos de construção - Determinação da resistência térmica pelos métodos de placa quente protegida e fluxometria de calor de produtos de resistência térmica elevada e média*. Monte de Caparica: IPQ.
- Nusier, O., e Abu-Hamdeh, N. (2003). Laboratory techniques to evaluate thermal conductivity for some soils. *Heat and Mass Transfer*, 39(2), 119–123. doi:10.1007/s00231-002-0295-x
- Omer, A. M. (2008). Ground-source heat pumps systems and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(2), 344–371. doi:10.1016/j.rser.2006.10.003
- Pettijohn, F. (1948). A preface to the classification of Sedimentary rocks. *The Journal of Geology*, 56(2), 112–117.

- Powrie, W., e Preene, M. (2009). Ground energy systems: from analysis to geotechnical design. *Géotechnique*, 59(3), 261–271. doi:10.1680/geot.2009.59.3.261
- Presley, M., e Christensen, P. (1997). Thermal conductivity measurements of particulate materials 1. A review. *Journal of Geophysical Research*, 102(E3), 6535–6549.
- Rafferty, K. (2003). Ground Water Issues in Geothermal Heat Pump Systems. *Ground Water*, 41(4), 408–410. doi:10.1111/j.1745-6584.2003.tb02374.x
- Raymond, J., Therrien, R., e Gosselin, L. (2011). Borehole temperature evolution during thermal response tests. *Geothermics*, 40(1), 69–78. doi:10.1016/j.geothermics.2010.12.002
- Rees, S., Spitler, J., Deng, Z., Orio, C., e Johnson, C. (2004). A Study of Geothermal Heat Pump and Standing Column Well Performance. *ASHRAE Transactions*, 110(1), 3–13.
- Rees, S. W., Adjali, M. H., Zhou, Z., Davies, M., e Thomas, H. R. (2000). Ground heat transfer effects on the thermal performance of earth-contact structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 4(3), 213–265. doi:10.1016/S1364-0321(99)00018-0
- RETSreen International. (2005). *Clean Energy Project Analysis: RETScreen Engineering and Cases* (p. 456). Natural Resources Canada.
- Rubio, C., Josa, R., e Ferrer, F. (2011). Influence of the Hysteretic Behaviour on Silt Loam Soil Thermal Properties. *Open Journal of Soil Science*, 01(03), 77–85. doi:10.4236/ojss.2011.13011
- Saito, T., Hamamoto, S., Ei Mon, E., Takemura, T., Saito, H., Komatsu, T., e Moldrup, P. (2014). Thermal properties of boring core samples from the Kanto area, Japan: Development of predictive models for thermal conductivity and diffusivity. *Soils and Foundations*, 54(2), 116–125. doi:10.1016/j.sandf.2014.02.004
- Sanner, B., Hellström, G., Spitler, J., e Gehlin, S. (2005). Thermal Response Test – Current Status and World-Wide Application. In *Proceedings World Geothermal Congress 2005*. Antalya.
- Sanner, B., Mands, E., Sauer, M., e Grundmann, E. (2008). Thermal Response Test, a routine method to determine thermal ground properties for GSHP design. In *9th International IEA Heat Pump Conference, 20-22 May* (pp. 20–22). Zurich.
- Sauerwein, M., e Hude, von der. (2007). Practical application of energy piles. In *14th Darmstadt Geotechnical Conference 15 March 2007* (pp. 111–127).
- Self, S., Reddy, B., e Rosen, M. (2013). Geothermal heat pump systems: Status review and comparison with other heating options. *Applied Energy*, 101, 341–348. doi:10.1016/j.apenergy.2012.01.048

- Singh, D. N., e Devid, K. (2000). Generalized relationships for estimating soil thermal resistivity. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 22(3-4), 133–143. doi:10.1016/S0894-1777(00)00020-0
- Singh, R. ., e Bouazza, A. (2010). Thermal Conductivity of Kaolin Using Steady State Method. In *6th International Congress on Environmental Geotechnics* (pp. 1478–1481). New Delhi.
- Suryatriyastuti, M., Mroueh, H., e Burlon, S. (2012). Understanding the temperature-induced mechanical behaviour of energy pile foundations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(5), 3344–3354. doi:10.1016/j.rser.2012.02.062
- Tarnawski, V., e Leong, W. (2012). A Series-Parallel Model for Estimating the Thermal Conductivity of Unsaturated Soils. *International Journal of Thermophysics*, 33(7), 1191–1218. doi:10.1007/s10765-012-1282-1
- Tidall, J., Kunkel, J., e Anderson, D. (1999). *Unsaturated Zone Hydrology for Scientists and Engineers*. New Jersey: Prentice Hall.
- Usowicz, B. (1992). Statistical-Physical Model of Thermal Conductivity in Soil. *Polish Journal of Soil Science*, XXV(25-34).
- Usowicz, B., Lipiec, J., Marczewski, W., e Ferrero, A. (2006). Thermal conductivity modelling of terrestrial soil media—a comparative study. *Planetary and Space Science*, 54(11), 1086–1095. doi:10.1016/j.pss.2006.05.018
- Usowicz, B., Lipiec, J., Usowicz, J., e Marczewski, W. (2013). Effects of aggregate size on soil thermal conductivity : Comparison of measured and model-predicted data. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 57(2), 536–541. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.067
- Valente, A., Morais, R., Couto, C., e Correia, J. (2004). Modeling , simulation and testing of a silicon soil moisture sensor based on the dual-probe heat-pulse method. *Sensors and Actuators*, 115, 434–439. doi:10.1016/j.sna.2004.04.056
- Valente, A., Morais, R., Tuli, A., Hopmans, J., e Kluitenberg, G. (2006). Multi-functional probe for small-scale simultaneous measurements of soil thermal properties, water content, and electrical conductivity. *Sensors and Actuators A: Physical*, 132(1), 70–77. doi:10.1016/j.sna.2006.05.010
- Vieira, A., e Maranhã, J. (2009). Estudo de Modelação Numérica do Comportamento de Estruturas Termoactivas. In: *Actas do 12º Congresso Nacional de Geotecnia*, Lisboa.

- Wang, J., e Hayakawa, K. (1993). Maximum Slope Method for Evaluating Thermal Conductivity Probe Data. *Journal of Food Science*, 58(6), 1340–1345. doi:10.1111/j.1365-2621.1993.tb06179.x
- Williams, C., Reed, M., e Anderson, A. (2011). Updating the classification of geothermal resources. In *Thirty-Sixth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering-Stanford University*. Stanford.
- Williams, J., e Smith, M. (1989). *The Frozen Earth-Fundamentals of Geocryology*. (p. 323). New York: Cambridge University Press.
- Yun, T. S., e Santamarina, J. C. (2007). Fundamental study of thermal conduction in dry soils. *Granular Matter*, 10(3), 197–207. doi:10.1007/s10035-007-0051-5
- Zeb, A., Firdous, T., e Maqsood, A. (2010). Thermophysical properties of dunite rocks as a function of temperature along with the prediction of effective thermal conductivity, 2(6), 626–630.
- Zhang, C., Guo, Z., Liu, Y., Cong, X., e Peng, D. (2014). A review on thermal response test of ground-coupled heat pump systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 851–867. doi:10.1016/j.rser.2014.08.018